

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**



**DESARROLLO DE UN ALGORITMO DE CONTROL DE HUMEDAD  
PARA UNA CAMARA CLIMÁTICA**

**POR**

**LUIS ARTURO VALDEZ HINOJOSA**

**EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA  
INGENIERÍA CON ORIENTACIÓN EN ENERGÍAS TÉRMICA Y  
RENOVABLE**

**NOVIEMBRE, 2015**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA  
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**TESIS**

**DESARROLLO DE UN ALGORITMO DE CONTROL DE HUMEDAD  
PARA UNA CAMARA CLIMÁTICA**

**POR  
ING. LUIS ARTURO VALDEZ HINOJOSA**

**EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA  
INGENIERÍA CON ORIENTACIÓN EN ENERGÍAS TÉRMICA Y  
RENOVABLE**


**DIRECTOR: DR. SANTOS MÉNDEZ DÍAZ**

**NOVIEMBRE, 2015**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA  
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la tesis "Desarrollo de un Algoritmo de Control de Humedad para una Cámara Climática" realizada por el alumno LUIS ARTURO VALDEZ HINOJOSA, con número de matrícula 836921, sea aceptada para su defensa en opción al grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería con Orientación en Energías Térmica y Renovable.

El Comité de Tesis

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Santos Méndez Díaz  
Asesor.  
\_\_\_\_\_  
Oscar Alejandro de la Garza de León  
Co-Asesor.  
\_\_\_\_\_  
Dr. David Alejandro Díaz Romero  
Revisor  
\_\_\_\_\_  
M.C. Miguel García Yera  
Revisor  
\_\_\_\_\_  
Dr. Simón Martínez-Martínez  
Subdirector de Estudios de Posgrado

San Nicolás de los Garza, N. L. a 13 de Noviembre del 2015

### ***Agradecimientos:***

Al Dr. Santos Méndez, director de tesis, por su labor de tutor durante estos años en el departamento y en la realización de este trabajo.

Al Dr. Simón Martínez por haber creído en mí y darme la oportunidad de pertenecer a este grupo de trabajo.

Al Dr. Fausto Sánchez por su apoyo, sus enseñanzas académicas y profesionales.

A los profesores Dr. Arturo Morales, M.C. Miguel Yera, Dra. Elvira Martínez y el Dr. Oscar Alejandro de la Garza de León por sus enseñanzas en las aulas de clase y en el laboratorio.

A los compañeros de la maestría, especialmente Víctor, Adolfo, Cesar y Mario que su apoyo fue muy importante para el cumplimiento de esta meta.

### ***Dedicación:***

*A mi amada esposa Mirna Maricela quien con su apoyo he logrado cada meta y reto frente a mí.*

*A mí amado Papá y Mamá Luis Valdez Moreno y Rosa María Hinojosa Silva quienes sin su amor nada me sería posible.*

*A mi hija Myriam Andrea y mi hijito Luis Gerardo quienes me alientan cada día ser mejor.*

*A mis hermanos Ricardo Valdez Hinojosa y Carlos Valdez Hinojosa*

*A mi hermana Rosa Alejandra Valdez Hinojosa*

## Resumen

El presente documento muestra una metodología que permite crear un modelo empírico para un proceso de humidificación de una cámara climática y este modelo pueda ser simulado usando el software de Matlab/Simulink. Para iniciar el modelo empírico del proceso de humidificación se hace un análisis de la termodinámica del aire húmedo y así conocer las características a considerar para el proceso de humidificación, mediante esta información fue posible desarrollar el modelo de la función de transferencia del proceso de humidificación de la cámara climática obteniendo información como la ganancia del proceso ( $k_p$ ), el tiempo del proceso ( $T_p$ ), el tiempo muerto ( $\theta$ ) esto al analizar la curva de reacción de este proceso representada por la función de transferencia. Con este modelo desarrollado fue posible simular el comportamiento del sistema con respecto al tiempo siendo su variable controlada el porcentaje de humedad relativa.

Para este trabajo se ha dado a la tarea de incursionar en dos estrategias de control las cuales son el modelo matemático PID (Proporcional, Integral y Derivativo) y el control por medio de Lógica Difusa.

El PID es el método de control industrial más usado en la actualidad, existen diferentes formas de calcular este método matemático, para este trabajo se tomó el método de Ajuste mediante criterios de minimización de índices de funcionamiento ya que sus fórmulas de ajuste de integral mínima de error consideran la entrada de perturbaciones y estas son aplicadas a los valores obtenidos de la curva de reacción del proceso.

El método de control por Lógica Difusa es una rama de la inteligencia artificial que se funda en el concepto “todo es cuestión de grado”, lo cual permite manejar información vaga o de difícil especificación si quisiéramos hacer cambiar con esta información el funcionamiento o el estado de un sistema específico. Entonces es posible con la Lógica Difusa gobernar un sistema por medio de reglas de “sentido común” las cuales se refieren a cantidades indefinidas. Este método se fundamenta en reglas con forma de “Si....Entonces.....” donde valores lingüísticos (adjetivos o etiquetas que hacen una descripción cualitativa de la función o conjunto) de la premisa y el consecuente están definidos por conjuntos. El objetivo de la Lógica Difusa es ofrecer los fundamentos para efectuar el raciocinio aproximado.

Para la creación del modelo de Lógica Difusa consistió en tomar la información existente de experiencia para el proceso de humidificación y aplicarlo para el uso de la cámara climática, con esta información son creadas un conjunto de reglas con las cuales se estará gobernando el control, esto elimina la necesidad de cálculos matemáticos complejos y es una de las ventajas del control por

Lógica Difusa ya que de esta manera es posible controlar procesos no lineales sin el uso de matemáticas avanzadas.

Ya con el bloque de Lógica Difusa desarrollado se plantea con los demás modelos matemáticos desarrollados para el proceso de humidificación y se plantean dos algoritmos de control: el primero es un lazo cerrado de control con PID y el segundo es un lazo cerrado con control por lógica difusa.

Se hace una comparativa de esta estrategia de control por Lógica Difusa con el modelo de control PID. Ambos modelos nos llevan al punto de consigna y mantienen a la variable controlada con estabilidad, la respuesta del Lazo Cerrado del Control por Lógica Difusa obtuvo mejor respuesta que el modelo del PID.

## INDICE

Capítulo 1 .....	1
Antecedentes .....	1
1.1 Introducción .....	1
1.2 Motivación.....	1
1.3 Justificación .....	1
1.4 Objetivo General.....	1
1.5 Objetivos Particulares .....	2
Objetivo Particular A .....	2
Objetivo Particular B .....	2
Objetivos Particular C.....	2
1.6 Planteamiento del Problema.....	2
1.7 Hipótesis .....	2
1.8 Organización de la Tesis .....	2
Capítulo 2 .....	4
Marco Teórico Termodinámica del aire húmedo.....	4
2.1 Aire seco y Aire Atmosférico.....	4
2.2 Humedad Específica y Relativa del Aire.....	4
2.3 Temperatura de Punto de Rocío .....	6
2.4 Temperatura de Saturación Adiabática y de Bulbo Húmedo .....	6
2.5 Carta Psicométrica .....	7
2.6 Humedad Absoluta ( $\omega$ ).....	7
2.7 Temperatura de Bulbo Seco (Tbs).....	8
2.8 Temperatura de Bulbo Húmedo (Tbh) .....	8
2.9 Temperatura de punto de rocío (Tpr) .....	9
2.10 Humedad Relativa (%HR).....	9
2.11 Entalpía (h) .....	10
2.12 Volumen Específico ( $v$ ).....	10
2.13 Procesos de Acondicionamiento de Aire.....	11
2.14 Calentamiento y enfriamiento simples ( $\omega$ =constante) .....	12
2.15 Enfriamiento simple.....	12
2.16 Calentamiento con Humidificación .....	13
2.17 Enfriamiento con Deshumidificación .....	14
2.18 Estado del Arte Proceso de Humidificación .....	15
Capítulo 3 .....	18



Descripción del Proceso y Teoría de Control para el Acondicionamiento del Aire de la Cámara Climática.....	18
3.1 Cámara Climática .....	18
3.2 Humidificador .....	19
3.3 Solid Control Relay (SCR) para sistema de humidificación.....	20
3.4Deshumidificador .....	21
3.5 Compact Field Point (NI cFP-2200).....	21
3.6 Sensor de Humedad Relativa.....	22
3.7 Función de Transferencia.....	23
3.8 Diagrama de Bloques .....	23
3.9 Control Automático de Procesos.....	23
3.10 Objetivos del Control Automático .....	24
3.11 Sistema de control en lazo cerrado en comparación con sistemas en lazo abierto .....	25
3.12 Sistemas de primer orden.....	26
3.13 Tiempo muerto.....	26
3.14 Constante de tiempo.....	27
3.15 Ganancia .....	28
3.16 Control PID.....	29
3.16.1 Acción de Control Proporcional-Integral-Derivativa.....	29
3. 17 Ajuste mediante criterios de minimización de índices de funcionamiento .....	31
3. 17.1 Integral del valor absoluto del error (IAE) .....	32
3.17.2 Integral del cuadrado del error (ICE) .....	32
3.17.3 Integral del valor absoluto del error ponderado en tiempo (IAET) .....	33
3.17.4 Integral del cuadrado del error ponderado en tiempo (ICET) .....	33
3.18 Metodología para el desarrollo del bloque de control con PID .....	34
3.19 Control Difuso (Fuzzy Logic Control) .....	34
3.19 Lógica Difusa (Fuzzy Logic). Introducción .....	36
3.19.1 Definiciones usadas en el Fuzzy Logic .....	36
3.19.2 Etapas de un sistema Fuzzy .....	37
3.19.2.1 Etapa de Fuzzyficación.....	37
3.19.2.2 Reglas de Evaluación .....	38
3.19.2.3 Defuzzyficación .....	40
3.20 Matlab y Simulink .....	42
3.21 Fuzzy Logic Toolbox (Simulink/Matlab) .....	43

3.22 Metodología para el Proceso del Bloque del Fuzzy Logic para el Acondicionamiento de la Cámara.....	44
Capítulo4 .....	45
Diseño y Simulación del Algoritmo de Control de Humedad.....	45
4.1 Visión general del diseño .....	45
4.2 Sensor y Transmisor de Humedad Relativa (HR) .....	46
4.3Análisis matemático del proceso a humidificar .....	47
4.4 Modelo empírico del proceso de humidificación.....	49
4.5 Identificación con Matlab del sistema de primer orden con retardo .....	50
4.5.1 Método de la Tangente de Ziegler y Nichols .....	50
4.6 Sintonía por Criterios Integrales (Control Regulatorio).....	51
4.7Fuzzy Logic Control (Control Lógico Difuso).....	53
4.7.1 Desarrollo del Bloque de Control Difuso de Humedad usando Fuzzy Logic ToolBox de Matlab .....	53
Capítulo5 .....	57
Simulaciones y Resultados.....	57
5.1 Introducción .....	57
5.2 Metodología de simulaciones .....	57
5.2.1 Respuesta en Lazo Cerrado de la Planta a Controlar.....	57
5.2.2 Lazo de Control con PID .....	58
5.2.3 Bloque de Control Difuso .....	59
5.2.4 Lazo de Control Difuso .....	59
5.2.5 Lazo de Control Difuso vs Control PID .....	60
5.3 Discusión de Resultados .....	63
Capítulo6 .....	65
Conclusiones y Trabajo Futuro .....	65
6.1 Conclusiones .....	65
6.2 Trabajo Futuro.....	66
6.3 Bibliografía.....	67

## ÍNDICE DE FIGURAS:

Figura 1 Curva de saturación del aire.....	7
Figura2 Líneas de humedad absoluta .....	8
Figura 3 Temperatura de bulbo seco.....	8
Figura 4 Temperatura de bulbo húmedo .....	9
Figura 5 Temperatura de rocío.....	9
Figura 6 Curvas de humedad relativa.....	10
Figura7 Líneas de entalpía en KJ/Kg del aire seco .....	10
Figura8 Líneas del volumen específico de aire seco .....	11
Figura 9 Durante el calentamiento simple, la humedad específica permanece constante, pero la humedad relativa disminuye.....	12
Figura 10 Enfriamiento simple .....	13
Figura 11 Calentamiento con humidificación.....	13
Figura 12 Enfriamiento con Deshumidificación.....	14
Figura 13 Esquema del interior de la cámara de clima controlado .....	19
Figura 14 Configuración de los conductos.....	19
Figura 15 Humificador Isotérmico.....	20
Figura 16 Circuito de Control de Humidificación y Controlador rectificador de silicio... ..	20
Figura 17 Deshumificador recomendado .....	21
Figura 18 Controlador en Tiempo Real con 128 MB DRAM, 128 MB de Almacenamiento.....	22
Figura 19 Sensor HR/Punto de Rocío .....	22
Figura 20 Diagrama de Bloques Básico para una función de transferencia .....	23
Figura 21 Diagrama de bloques del proceso a controlar. Sistema de Lazo Cerrado. ..	24
Figura 22 Diagrama de bloques de un sistema de Lazo Cerrado.....	25
Figura 23 Tiempo muerto.....	26
Figura 24 Respuesta de un proceso de primer orden a un cambio en escalón de la función de forzamiento-constante de tiempo.....	28
Figura 25 Diagrama de bloques del PID .....	30
Figura26 Integrales del Error para cambios en la perturbación y en el Set Point. ....	32
Figura 27 Metodología a seguir para el control PID del proceso de humidificación para la cámara climática. ....	34
Figura 28 Diagrama de bloques de control para humidificación para la cámara climática.....	35
Figura 29 Diagrama de bloques de controlador difuso genérico.....	36
Figura 30 Términos Lingüísticos para la variable Humedad en la cámara.....	37
Figura 31 Etapa de Fuzzyficación. ....	38
Figura 32 Etapa de Reglas de Evaluación.....	39
Figura 33 Etapa de Defuzzyficación. ....	41
Figura 34 Salida de la Etapa de Defuzzyficación por el Método de Centroide .....	41
Figura 35 Inference Fuzzy diagrama. ....	42
Figura 36 Metodología del bloque de Fuzzy Logic para el proceso de humidificación. ....	44
Figura 37 Función de transferencia del sensor de humedad.....	47
Figura 38 El volumen de la cámara es de $39.30\text{m}^3$ .....	47

Figura 39	Flujo másico de 33lbm/hr .....	48
Figura 40	Curva de respuesta de primer orden del proceso de humidificación .....	51
Figura 41	Diagrama de bloques de función de transferencia con PID simulado en Simulink .....	52
Figura 42	Curva de respuesta del bloque de la función de transferencia con el control PID .....	53
Figura 43	Editor de Inputs y Outputs .....	53
Figura 44	Funciones de la variable de entrada "HumCam" .....	54
Figura 45	Funciones de la variable de entrada "HumRef" .....	55
Figura 46	Funciones de la variable de salida "SalidaHumedad" .....	55
Figura 47	Reglas de interacción del Fuzzy de humedad .....	56
Figura 48	Grafico 3D que representa la interacción entre las dos entradas y la salida a nuestro FLC .....	56
Figura 49	Lazo cerrado de la planta a controlar. ....	58
Figura 50	Respuesta del controlador PID. ....	58
Figura 51	Respuesta del controlador PID. ....	59
Figura 52	Respuesta del bloque del control difuso aplicado a la planta. ....	60
Figura 53	Lazos de control con PID y Lógica Difusa con punto de consigna a 90%HR .....	61
Figura 54	Respuesta a 90%HR del bloque del PID aplicado a la planta. ....	61
Figura 55	Respuesta a 90%HR del bloque del Control Difuso aplicado a la planta. ....	62
Figura 56	Lazos de control con PID y Lógica Difusa con punto de consigna a 45%HR .....	62
Figura 57	Lazos de control con PID y Lógica Difusa con punto de consigna a 45%HR .....	63

## ÍNDICE DE TABLAS:

Tabla 1	Fórmulas de Sintonización para Integración Mínima en presencia de perturbaciones de entrada. ....	33
Tabla 2	Reglas propuestas para el sistema de humidificación de la cámara climática. ....	40
Tabla 3	Funciones de Membrecía a usar en nuestro FLC .....	54

# Capítulo 1

## Antecedentes

### 1.1 Introducción

A través de este proyecto se busca desarrollar e implementar un algoritmo de control para humedad dentro de la cámara de ambiente controlado de la que dispone el grupo de Investigación e Innovación en Tecnología Energética de la Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (UANL-FIME). Las cámaras de ambiente controlado son recintos en los que se crean de forma artificial las condiciones necesarias para que se lleven a cabo algunas funciones, presentan un amplio rango de aplicaciones como son simulación ambiental, envejecimiento acelerado, control de calidad, investigación de materiales y sistemas, estudio de estabilidad de productos y acondicionamiento húmedo. Estos dispositivos se diseñan en función de cada aplicación teniendo en cuenta variables fundamentales tales como la capacidad de enfriamiento, capacidad de calentamiento, capacidad de humidificación, las dimensiones del recinto de ensayo y la carga térmica.

La cámara climática de bajo costo que se desarrolló en los laboratorios de la FIME-UANL, ha respondido con los parámetros de diseño de control de temperatura en un rango de 15°C a 30°C con una variación máxima de  $\pm 1^\circ\text{C}$ . El sistema de control gobierna una válvula de expansión electrónica, una válvula de gas caliente y una resistencia calefactora.

Este trabajo se orienta a la generar un algoritmo de control para la gestión de la humidificación de una cámara de clima controlado haciendo uso del controlador convencional PID y del algoritmo de control Fuzzy Logic (Lógica Difusa).

### 1.2 Motivación

La humedad afecta el desempeño de los dispositivos térmicos y mediante este trabajo se desarrolla un algoritmo para gestionar la producción de humedad dentro de la cámara climática al mismo tiempo obtenemos el conocimiento para implementar un control de humedad en ambientes controlados.

### 1.3 Justificación

Estos ambientes controlados resultan de gran utilidad, ya que facilitan la obtención de un producto en entornos diferentes a los habituales y durante diferentes estaciones climatológicas. Las cámaras de ambiente controlado deben contar con una fuente de frío, una de calor y humedad que simulan las del ambiente natural.

### 1.4 Objetivo General

Desarrollar un algoritmo de generación y control de Humedad que será una herramienta útil para el uso en cámaras climáticas.

## **1.5 Objetivos Particulares**

### **Objetivo Particular A**

Diseñar un algoritmo de control para la Humidificación de la cámara de clima controlado.

### **Objetivo Particular B**

Generar conocimiento usando estrategias de control de PID y Control Lógica Difusa mediante la herramienta computacional de Matlab/Simulink para generar el algoritmo.

### **Objetivos Particular C**

Aplicar técnicas innovadoras como el modelo PID en combinación del Control por Lógica Difusa y así analizar el rendimiento de esta combinación de modelos matemáticos para control aplicándolos en procesos térmicos.

## **1.6 Planteamiento del Problema**

El proyecto surge de la necesidad de incrementar las funciones de esta cámara de ambiente controlado con la que cuenta el Laboratorio de Innovación Tecnológica en Energía de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica ya que resultan de gran utilidad por que facilitan la obtención de un producto en entornos diferentes a los habituales y durante diferentes estaciones climatológicas. Nos abre la oportunidad de conocer y experimentar estrategias de control para aplicaciones de procesos térmicos que en nuestro trabajo está relacionado con el uso del método Proporcional-Integral-Derivativo (PID) el cual es un tradicional control lineal muy usado en la industria en tareas de confort térmico, calentamiento y aplicaciones de enfriamiento y así mismo conocer y aplicar el Control de Lógica Difusa (FLC) con el cual usamos una técnica computacional que se encuentra cada vez más en modernas estrategias de control relacionados con sistemas de energía. Así mismo por medio de estos modelos se espera obtener una mejor respuesta de acción por parte de esta combinación de control (PID+Logica Difusa) que solo usando un control convencional.

## **1.7 Hipótesis**

Es posible desarrollar un algoritmo de control para la humedad como variable a controlar usando los modelos matemáticos de PID y Lógica Difusa (Fuzzy Logic) que permita generar y mantener un proceso dinámico estable en un ambiente controlado y tener un mejor rendimiento de control y robustez en el sistema.

## **1.8 Organización de la Tesis**

En el Capítulo 2 se abordan los conceptos fundamentales que describen matemáticamente los fenómenos de la termodinámica del aire húmedo. En el Capítulo 3 se hace la descripción del sistema de acondicionamiento de aire y sus elementos principales. En el Capítulo 4 se presenta un resumen de las

cuestiones más relevantes reportadas en el estado del arte en lo que a estudios del acondicionamiento del aire húmedo respecta en cámaras de ambiente controlado. En el Capítulo 5 se desarrolla el algoritmo de control PID y Fuzzy Logic (Lógica Difusa) además de que se ejecuta su simulación haciendo uso de Matlab/Simulink. En el Capítulo 6 se presentaran todos los resultados obtenidos, usándolos para comprobar que los objetivos de la tesis se han cumplido. Así mismo se muestra la literatura utilizada para la generación de este trabajo

# Capítulo 2

## Marco Teórico Termodinámica del aire húmedo

### 2.1 Aire seco y Aire Atmosférico

El aire es una mezcla de nitrógeno, oxígeno y pequeñas cantidades de otros gases. Normalmente, el aire en la atmósfera contiene cierta cantidad de vapor de agua (o humedad) y se conoce como **aire atmosférico**.

En contraste, el aire que no contiene vapor de agua se denomina **aire seco**.

El vapor de agua en el aire se comporta como si existiera solo y obedece la relación de gas ideal:  $P_v = RT$ . En este caso, el aire atmosférico se trata como una mezcla de gases ideales cuya presión es la suma de la presión parcial del aire seco ( $P_a$ ) y la del vapor de agua ( $P_v$ ):

$$P = P_a + P_v \quad (\text{kpa}) \quad (2.1)$$

A la presión parcial del vapor de agua se le conoce como **presión de vapor**. Es la presión que el vapor de agua ejercería si existiera solo a la temperatura y volumen del aire atmosférico.

Dado que el vapor de agua es un gas ideal, la entalpía del vapor de agua es una función exclusiva de la temperatura, es decir,  $h = h(T)$ . Por lo tanto la entalpía del vapor de agua en el aire puede considerarse igual a la entalpía del vapor saturado a la misma temperatura.

$$h_v = (T, \text{bajo } P) \cong h_g(T) \quad (2.2)$$

La entalpía del vapor de agua a 0 °C es 2 500.9 kJ/kg. El valor  $C_p$  promedio del vapor de agua en el intervalo de temperatura de -10 a 50 °C puede considerarse igual a 1.82 kJ/kg · °C. Por lo tanto, la entalpía del vapor de agua se determina aproximadamente a partir de:

$$h_g(T) \cong 2500.9 + 1.82T \quad (\text{KJ/kg}) \quad T \text{ en } ^\circ\text{C} \quad (2.3)$$

$$h_g(T) \cong 1060.9 + 0.435T \quad (\text{Btu/lbm}) \quad T \text{ en } ^\circ\text{F} \quad (2.4)$$

### 2.2 Humedad Específica y Relativa del Aire

La cantidad de vapor de agua en el aire puede determinarse mediante el cálculo la masa de vapor de agua presente en una unidad de masa de aire seco, a la que se denomina **humedad absoluta** o **específica** (conocida también como relación de humedad) y que se representa por medio de  $\omega$  :



$$\omega = \frac{m_v}{m_a} \quad (\text{kg Vapor de agua/kg aire seco}) \quad (2.5)$$

La humedad específica también se expresa como:

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} = \frac{P_v V / R_v T}{P_a V / R_a T} = \frac{P_v / R_v}{P_a / R_v} = 0.622 \frac{P_v}{P_a} \quad (2.6)$$

$$\omega = \frac{0.622 P_v}{P - P_v} \quad (\text{kg vapor de agua/kg aire seco}) \quad (2.7)$$

Donde P es la presión total.

Considere 1 kg de aire seco. Por definición, el aire seco no contiene vapor de agua y, por ende, su humedad específica es cero. Ahora añada algo de vapor de agua a este aire seco. La humedad específica aumentará. A medida que se añada más vapor o humedad, la humedad específica crecerá hasta que el aire ya no pueda contener más humedad. En este punto se dice que el aire estará saturado por humedad, y se le denomina **aire saturado**. Cualquier humedad agregada al aire saturado se condensará.

La cantidad de vapor de agua en el aire saturado a una temperatura y presión especificadas puede determinarse a partir de la ecuación 2.7 si se sustituye **P<sub>v</sub>** por **P<sub>g</sub>**, la presión de saturación del agua a esa temperatura. La cantidad de humedad en el aire tiene un efecto definitivo en las condiciones de comodidad que ofrece un ambiente. Sin embargo, el nivel de comodidad depende más de la cantidad de humedad que el aire contiene (m<sub>v</sub>) respecto a la cantidad máxima de humedad que el aire puede contener a la misma temperatura (m<sub>g</sub>).

La relación entre estas dos cantidades se conoce como **humedad relativa**  $\phi$

$$\phi = \frac{m_v}{m_g} = \frac{P_v V / R_v T}{P_g V / R_v T} = \frac{P_v}{P_g} \quad (2.8)$$

donde  $P_g = P_{sat\_a\_T}$

Si se combinan las ecuaciones 2.7 y 2.8, también se puede expresar la humedad relativa como

$$\phi = \frac{\omega P}{(0.622 + \omega) P_g} \quad (2.9)$$

$$\omega = \frac{0.622\phi P_g}{P - \phi P_g} \quad (2.10)$$

La humedad relativa varía de 0 para aire seco a 1 para aire saturado. La cantidad de humedad que el aire puede contener depende de su temperatura. Por lo tanto, la humedad relativa del aire cambia con la temperatura aunque su humedad específica permanezca constante.

El aire atmosférico es una mezcla de aire seco y vapor de agua, por ello la **entalpía del aire** se expresa en términos de las entalpías del aire seco y del vapor de agua. En la mayor parte de las aplicaciones prácticas, la cantidad de aire seco en la mezcla de aire-vapor de agua permanece constante, pero la cantidad de vapor de agua cambia. En consecuencia, la entalpía del aire atmosférico se expresa por unidad de masa del aire seco, y no por unidad de masa de la mezcla de aire-vapor de agua. La entalpía total (una propiedad extensiva) del aire atmosférico es la suma de las entalpías del aire seco y del vapor de agua:

$$H = H_a + H_v = m_a h_a + m_v h_v \quad (2.11)$$

Al dividir entre masa obtiene:

$$h = \frac{H}{m_a} = h_a + \frac{m_v}{m_a} h_v = h_a + \omega h_v \quad (2.12)$$

$$h = h_a + \omega h_g \quad (\text{KJ/kg aire seco}) \quad (2.13)$$

Puesto  $h_v \cong h_g$

La temperatura ordinaria del aire atmosférico se conoce como la **temperatura de bulbo seco** para diferenciarla de otras formas de temperatura que deben estudiarse.

### 2.3 Temperatura de Punto de Rocío

El exceso de humedad en el aire se condensa en las superficies frías y forma el rocío.

La **temperatura de punto de rocío** ( $T_{pr}$ ) se define como la temperatura a la que se inicia la condensación si el aire se enfría a presión constante. En otras palabras ( $T_{pr}$ ) es la temperatura de saturación del agua correspondiente a la presión de vapor:

$$T_{pr} = T_{sat\_a\_P_v} \quad (2.14)$$

### 2.4 Temperatura de Saturación Adiabática y de Bulbo Húmedo

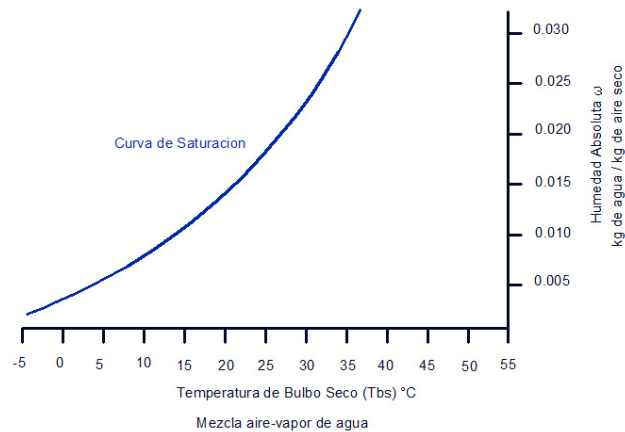
La temperatura de bulbo húmedo ( $T_{bh}$ ), es la temperatura de equilibrio que se alcanza cuando la mezcla de aire y vapor de agua pasa por un proceso de enfriamiento adiabático hasta llegar a la saturación.

El enfriamiento adiabático es el que se consigue mediante la evaporación del agua en el aire; consecuentemente la temperatura seca disminuye mientras aumenta la humedad. También llamado enfriamiento por evaporación.

## 2.5 Carta Psicométrica

Representación gráfica

El diagrama psicrométrico es la representación gráfica de las ecuaciones analíticas descritas anteriormente. La siguiente figura muestra la mezcla aire-vapor de agua. [4]



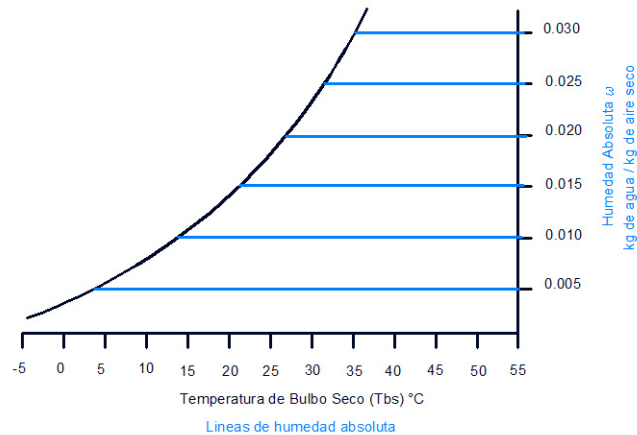
**Figura 1 Curva de saturación del aire**

Las distintas magnitudes que se representan en un diagrama psicrométrico son las siguientes:

- 1) Humedad Absoluta
- 2) Temperatura de bulbo seco
- 3) Temperatura de bulbo húmedo
- 4) Temperatura de punto de rocío
- 5) Humedad Relativa
- 6) Entalpia Especifica
- 7) Volumen Especifico

## 2.6 Humedad Absoluta ( $\omega$ )

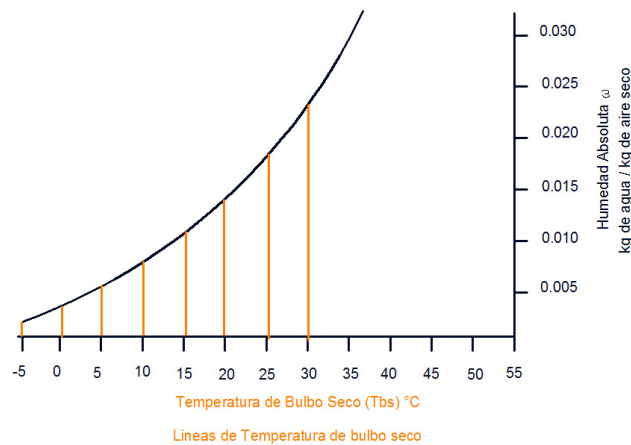
La humedad absoluta es el peso real de vapor de agua en el aire. También se le conoce como humedad específica. Los valores de esta propiedad se expresan en gramos de humedad por kilogramo de aire seco (g/kg) en el sistema internacional y en gramos por libra (gr/lb) en el sistema inglés. La humedad absoluta es la escala vertical (ordenada) la cual se encuentra a lado derecho del diagrama psicométrica, estas líneas corren horizontalmente de derecha a izquierda como muestra la siguiente figura:



**Figura2 Líneas de humedad absoluta**

## 2.7 Temperatura de Bulbo Seco (Tbs)

Es la temperatura medida con un termómetro ordinario. Las líneas se extienden verticalmente, desde la parte baja hasta la parte alta de la carta según se muestra la figura. También se les conoce como líneas de temperatura de bulbo seco constante o simplemente líneas de bulbo seco. Son constantes porque cualquier punto a lo largo de una de estas líneas, corresponde a la misma temperatura de bulbo seco indicada en la escala de la parte baja.



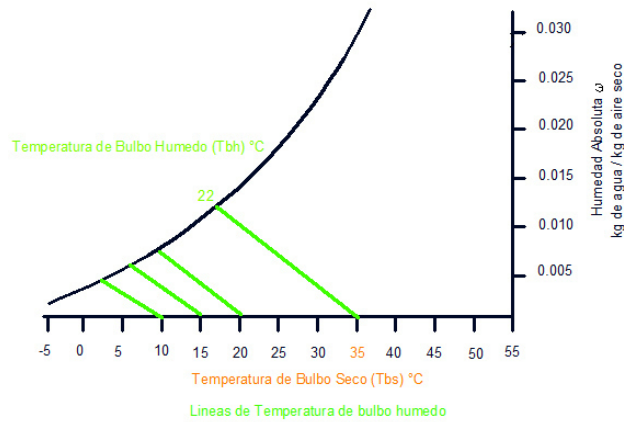
**Figura 3 Temperatura de bulbo seco**

## 2.8 Temperatura de Bulbo Húmedo (Tbh)

Corresponden a la temperatura medida con un termómetro de bulbo húmedo; es la temperatura que resulta cuando se evapora el agua de la mecha, que cubre el bulbo de un termómetro ordinario.

La escala de temperaturas de bulbo húmedo, es la que se encuentra del lado superior izquierdo, en la parte curva de la carta psicrométrica. Las líneas

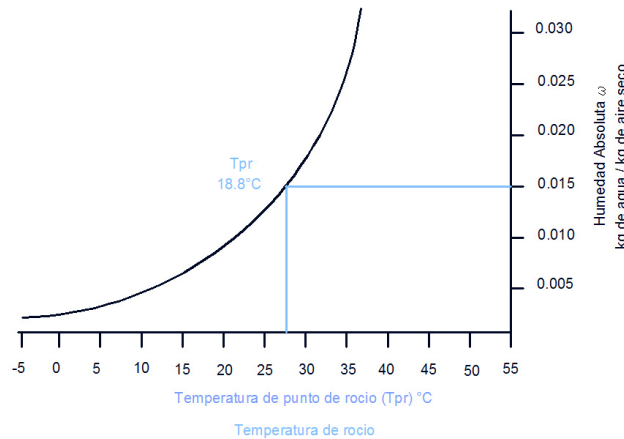
inclinadas de pendiente negativa corresponden a las isotérmicas de saturación adiabática las cuales coinciden con las de la temperatura de bulbo húmedo para el caso aire-vapor de agua.



**Figura 4 Temperatura de bulbo húmedo**

## 2.9 Temperatura de punto de rocío (Tpr)

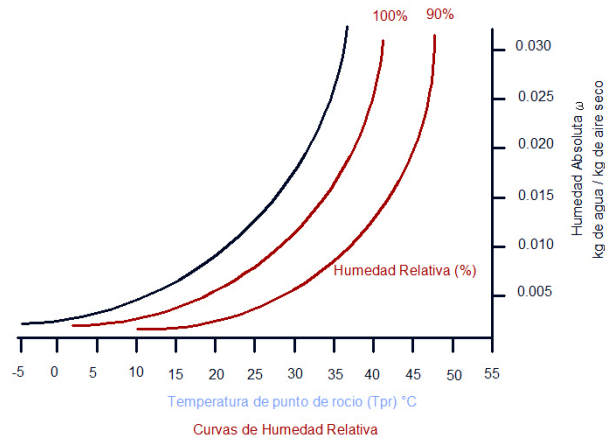
Esta es la temperatura en la cual se condensara la humedad sobre una superficie. La escala de Tpr es la misma que la escala de Tbh, es decir es la misma escala para ambas propiedades.



**Figura 5 Temperatura de rocío**

## 2.10 Humedad Relativa (%HR)

Son las líneas curvas que se extienden hacia arriba y hacia la derecha. Se expresan siempre en por ciento y este valor se indica sobre cada línea.

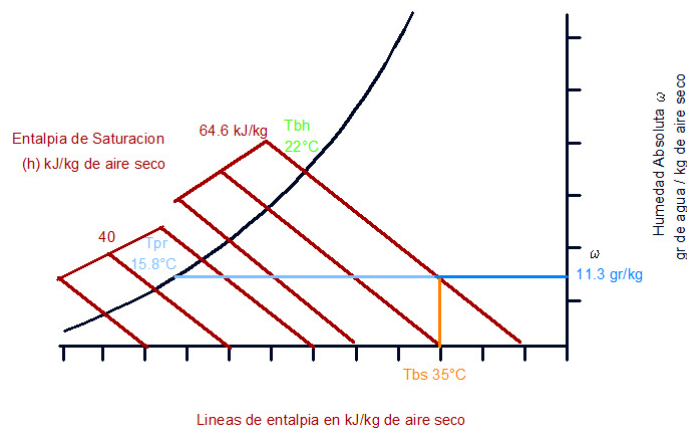


**Figura 6 Curvas de humedad relativa**

### 2.11 Entalpia (h)

Las líneas de entalpia constantes en una carta psicométrica, son las que se muestran en la figura. Debe notarse que estas líneas son meramente extensiones de las líneas de bulbo húmedo.

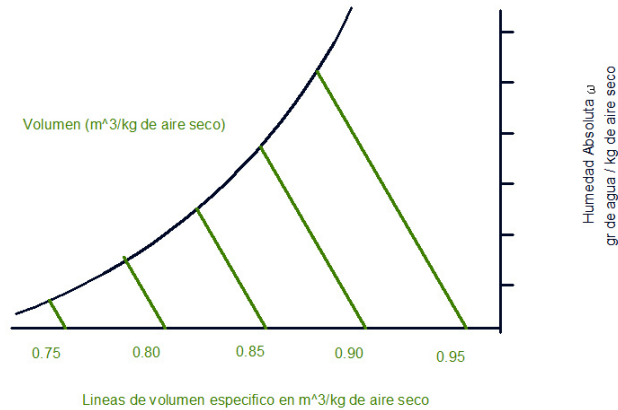
Puesto que el calor total del aire depende de la temperatura de bulbo húmedo (Tbh). La escala del lado izquierdo lejano a la línea curva, da el calor total del aire en kJ/kg (kilojulios por kilogramo) de aire seco, en el sistema internacional o Btu/lb de aire seco en el sistema inglés.



**Figura7 Líneas de entalpia en KJ/Kg del aire seco**

### 2.12 Volumen Específico ( $v$ )

Se muestran las líneas de volumen específico constante, estas líneas están en ángulo de  $60^\circ$  con la horizontal y van aumentando de valor de izquierda a derecha. El espacio entre cada línea, representa un cambio de volumen específico de  $0.05 \text{ m}^3/\text{kg}$ .



**Figura8 Líneas del volumen específico de aire seco**

### 2.13 Procesos de Acondicionamiento de Aire

Estos procesos incluyen el calentamiento simple (elevar la temperatura), el enfriamiento simple (reducir la temperatura), la humidificación (agregar la humedad) y la deshumidificación (eliminar humedad). Algunas veces dos o más de estos procesos son necesarios para llevar el aire al nivel de temperatura y humedad que se desea. [1,2]

La mayor parte de los procesos del acondicionamiento de aire pueden modelarse como procesos de flujo estacionario, y por lo tanto, la relación del

balance de masa  $\dot{m}_{ent} = \dot{m}_{sal}$  se expresa para el aire seco y el agua como

Balance de masa para el aire seco:

$$\sum_{ent} \dot{m}_a = \sum_{sal} \dot{m}_a \quad (\text{kg/s}) \quad (2.15)$$

Balance de masa para el agua:

$$\sum_{ent} \dot{m}_w = \sum_{sal} \dot{m}_w \quad \text{o} \quad \sum_{ent} \dot{m}_\omega \omega = \sum_{sal} \dot{m}_\omega \omega \quad (2.16)$$

Despreciando los cambios de energía cinética y potencial, la relación del

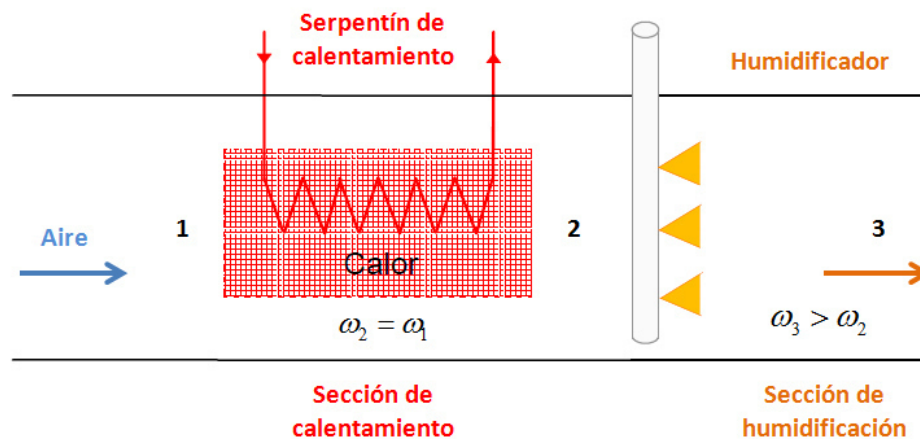
balance de energía de flujo estacionario  $\dot{E}_{ent} = \dot{E}_{sal}$  puede expresarse en estecaso como

$$\dot{Q}_{ent} + \dot{W}_{ent} + \sum_{ent} \dot{m}h = \dot{Q}_{sal} + \dot{W}_{sal} + \sum_{sal} \dot{m}h \quad (2.17)$$

El término “trabajo” por lo general consiste en el *trabajo del ventilador*, que es muy pequeño respecto de otros términos de la ecuación de la energía.

## 2.14 Calentamiento y enfriamiento simples ( $\omega$ =constante)

El calentamiento en esta aplicación esta dado en un vía donde un serpentín actúa como calentador o enfriador, se da un aumento de temperatura en el aire.



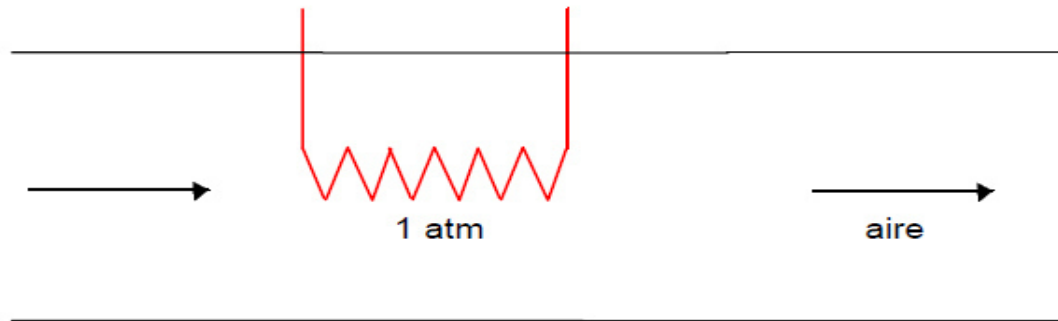
**Figura 9** Durante el calentamiento simple, la humedad específica permanece constante, pero la humedad relativa disminuye.

En este proceso la humedad no se añade ni se elimina por lo tanto permanece constante, de igual manera para el proceso de enfriamiento. La humedad relativa del aire disminuye durante un proceso de calentamiento incluso si la específica permanece constante. La humedad relativa es la relación entre el contenido de humedad y la capacidad del aire de sostener humedad aumenta con la temperatura. Dicho proceso de calentamiento procederá en la dirección de aumento de la temperatura de bulbo seco siguiendo una línea de humedad específica constante en la carta psicrométrica, la cual aparece como una línea horizontal.

## 2.15 Enfriamiento simple

Es un proceso muy similar al de calentamiento con excepción de la temperatura de bulbo seco que en este caso disminuye y la humedad relativa aumenta. Se enfría de igual manera que se calienta, con un serpentín pero se hace pasar alguna refrigerante por dentro de este.





**Figura 10 Enfriamiento simple**

Las ecuaciones para ambos procesos son muy parecidas y se pueden aplicar a ambas.

Principio de conservación de masa

$$\dot{m}_a = \dot{m}_{a1} = \dot{m}_{a2} \quad (2.18)$$

$$w_1 = w_2$$

La ecuación de conservación de energía esta dada por

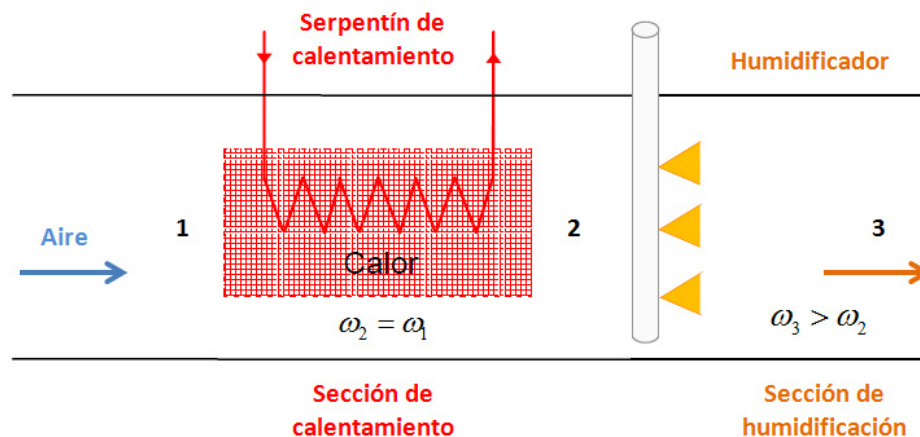
$$\dot{Q} = \dot{m}_a (h_2 - h_1) \quad (2.19)$$

O bien por unidad de masa

$$q = h_2 - h_1 \quad (2.20)$$

## 2.16 Calentamiento con Humidificación

Los problemas asociados con la humedad relativa baja, producto del calentamiento simple, se eliminan al humidificar al aire calentado. Esto se consigue al pasar el aire por una sección de calentamiento (proceso 1-2) y después por una sección de humidificación (proceso 2-3), como se muestra en la Figura 9.



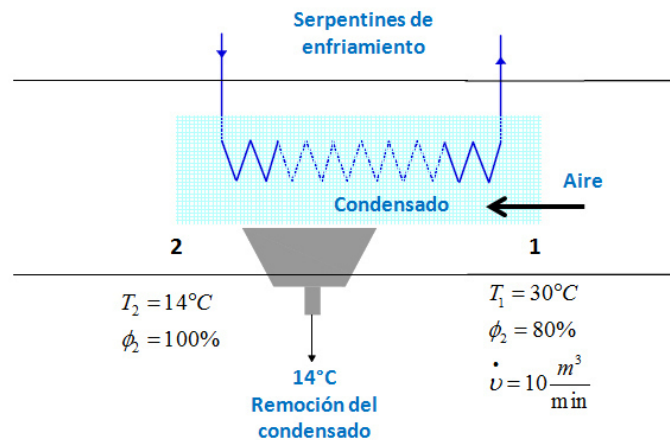
**Figura 11 Calentamiento con humidificación.**

La ubicación del estado 3 depende de cómo se lleve a cabo la humidificación. Si se introduce vapor en la sección de humidificación, se produce una razonable humidificación con calentamiento adicional ( $T_3 > T_2$ ). Si en vez de esto la humidificación se realiza al rociar agua en el flujo de aire, parte del calor latente de vaporización provendrá del aire, lo que producirá enfriamiento del flujo de aire ( $T_3 < T_2$ ). En este caso, el aire debe calentarse a una temperatura más alta en la sección de calentamiento, para compensar el efecto de enfriamiento durante el proceso de humidificación.

## 2.17 Enfriamiento con Deshumidificación

La humedad específica del aire permanece constante durante un proceso de enfriamiento simple, pero su humedad relativa aumenta. Si la humedad relativa alcanza niveles extremadamente altos, tal vez sea necesario eliminar algo de humedad en el aire, es decir, deshumidificarlo. Para esto es necesario enfriar el aire por debajo de su temperatura de punto de rocío.

El proceso de enfriamiento con deshumidificación se muestra de manera esquemática en la carta psicrométrica de la Figura 12. El aire caliente y húmedo entra a la sección de enfriamiento en el estado 1. A medida que pasa por los serpentines de enfriamiento, su temperatura disminuye y su humedad relativa aumenta a humedad específica constante.



**Figura 12 Enfriamiento con Deshumidificación.**

Si la sección de enfriamiento tiene la longitud suficiente, el aire alcanzará su punto de rocío (estado x, aire saturado). El enfriamiento adicional del aire resultará en la condensación de una parte de la humedad en el aire. Éste permanece saturado durante todo el proceso de condensación, que sigue una línea de 100% de humedad relativa hasta que alcanza el estado final (estado 2).

El vapor de agua, que se condensa saliendo del aire durante este proceso, se elimina de la sección de enfriamiento por medio de un canal independiente.

## **2.18 Estado del Arte Proceso de Humidificación**

Las cámaras de ambiente controlado son recintos en los que se crean de forma artificial las condiciones necesarias para que se lleven a cabo algunas funciones. Las cámaras de ambiente controlado presentan un amplio rango de aplicaciones, como simulación ambiental, envejecimiento acelerado, control de calidad, investigación de materiales y sistemas, estudio de estabilidad de productos, acondicionamiento húmedo, y análisis de comportamiento de especies animales y vegetales, entre otras.

Las cámaras de ambiente controlado se diseñan en función de cada aplicación, teniendo en cuenta variables fundamentales tales como la capacidad de enfriamiento; la capacidad de calentamiento; la capacidad de humidificación; las dimensiones del recinto de ensayo; el formato, compacto o por paneles ensamblables; la masa sometida al tratamiento, conservación o ensayo; la disipación térmica del contenido.

Para lograr estas funciones son utilizados diferentes tipos de algoritmos de control, este trabajo se enfocara en las estrategias de control de PID y Lógica Difusa (Fuzzy Logic).

Para explorar el resultado de esta combinación de control se revisa diferentes estudios como el reportado por los autores de [15] los cuales describen los resultados de la identificación y simulación del proceso de humidificación usando Matlab. Dentro del ambiente de Matlab es simulado el Fuzzy Logic Control el cual es muy apropiado para procesos no lineales. En este trabajo inician identificando el modelo del proceso de humidificación por medio del análisis grafico de lazo abierto donde se obtiene la curva de reacción del proceso obteniendo información como tiempo muerto, ganancia del proceso y tiempo del proceso con lo cual se construye un modelo de primer orden que representa a este proceso de humidificación.

Bajo un ambiente del software de Matlab/Simulink se realiza una simulación del proceso de humidificación. El modelo fue identificado usando la curva de reacción y validada con datos calculados. Se hace una comparación del tiempo de respuesta entre la generada por el modelo del PID vs. el modelo de control difuso dando como resultado que el control difuso presenta una respuesta más rápida que el PID para llegar al punto de consigna.

Stefan Koprda y Zoltan Balogh generan [16] un trabajo haciendo un diseño y simulación del controlador Fuzzy-PID para la optimización de la temperatura y humedad en un sistema termodinámico, inician haciendo un análisis de la parte termodinámica del sistema y haciendo uso de esta información construyen un modelo de primer orden (función de transferencia) que representa el comportamiento del sistema con respecto al tiempo, esto mostrado en su curva

de reacción presentada en este trabajo, partiendo del conocimiento del sistema se genera la lógica para el control difuso iniciando con el planteamiento de las entradas y salidas y así como también el conjunto de reglas que regirán este sistema. Ya una vez generado el bloque de Fuzzy Logic con el editor de FuzzyLogicToolBox de Matlab/Simulink, plantean un lazo cerrado de control donde mandan llamar el bloque de Lógica Difusa y es corrida la simulación y concluyen en que el controlador Difuso es capaz de controlar dos o más parámetros y puede ser usada esta técnica para optimización de tecnología tal como la optimización en consumo de energía además de dejar una metodología para abordar un caso de modelo empírico de un proceso y se esté simulado.

El sistema de Lógica Difusa es muy usado con éxito en procesos como Control de Ambiente (equipos de aire acondicionado, humidificadores), Equipos para el hogar (lavadoras, secadoras) [20]. El procedimiento que lleva a cabo un control difuso es sintetizando las habilidades humanas del operador en una base de reglas difusas y desarrollar así un sistema de control difuso. El diseñador del sistema difuso copia las acciones heurísticas del operador humano mientras controla el proceso y escribe las correspondientes reglas difusas. Mediante observaciones detalladas de un operador habilidoso, es posible obtener un conjunto completo de reglas difusas que puede reproducir el mejor rendimiento del operador humano. El resultado es un sistema de control inteligente.

Se plantea el caso del diseño de un controlador difuso para controlar la humedad en un invernadero [17], el algoritmo de control consta del bloque de Lógica Difusa creado en el editor de FuzzyLogicToolBox de Matlab/Simulink y este es anexado a un lazo cerrado con la planta del invernadero, el trabajo reporta una actuación satisfactoria por parte del controlador difuso el cual mantiene la humedad dentro del punto de consigna. De este trabajo se observa el lazo cerrado de control planteado con la planta a controlar.

El diseño de un control difuso para un control ambiental psicométrico [11] fue generado en este trabajo dando como resultado un bloque de lógica difusa con un conjunto de reglas para el control de la humedad las cuales proporcionan un muy buen sentido de lógica del proceso para mantener el punto de consigna de humedad requerida.

Para el caso del control PID con casi 60 años de antigüedad, sigue siendo usado ampliamente en aplicaciones industriales como referencia de estudios de comparación de desempeño contra nuevas estrategias de control [21], y como área de investigación y desarrollo, ofreciendo una buena alternativa para controlar procesos dinámicos como el presentado en este trabajo ofreciendo tiempos de respuesta aceptables y proceso de ajuste relativamente simple. En el trabajo reportado en esta tesis tomamos como base el modelo PID y es comparado contra el controlador difuso. El control lógico difuso basado en los trabajos desarrollados por LoftiZadeh en los 60's, también presenta características que lo hacen adecuado para el mismo fin, salvo que es capaz de

ofrecer un comportamiento de control altamente flexible y justarse a condiciones cambiantes como condiciones de desgaste ya cambios ambientales. Acorde al resultado de este trabajo un contralor difuso es más simple que un modelo PID y este puede alcanzar el mismo desempeño, el control por lógica difusa puede ser un sustituto del modelo PID tradicional. Una ventaja del controlador Fuzzy es que no se requiere conocer el modelo de la planta a controlar. Tanto para el modelo PID como el control por lógica difusa ambos pueden ser usados con ajustes experimentales para rápidamente dejar un sistema cumpliendo con los requerimientos necesarios [21].

En una comparación del PID convencional vs. el controlador Fuzzy Logic acorde al autor de este trabajo [23] muestra que el Fuzzy tiene mejor rendimiento de control, robustez y estabilidad.

Ambas estrategias de control PID y Fuzzy Logic son muy aceptadas para trabajos de control térmico esto en base a todas estas referencias.

# Capítulo 3

## Descripción del Proceso y Teoría de Control para el Acondicionamiento del Aire de la Cámara Climática

### 3.1 Cámara Climática

El Laboratorio de Investigación e Innovación en Tecnología Energética (LIITE) posee una cámara de clima controlado con el objetivo de evaluar el consumo energético de por lo menos cuatro refrigeradores domésticos. Además, la cámara es muy flexible para los casos en que se requiera realizar experimentos de transferencia de calor en distintas aplicaciones.

Una parte importante para el buen funcionamiento de la cámara es el control de temperatura. Se cuenta con el control de temperatura capaz de mantener la temperatura constante en un rango de  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  hasta los  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Para tal propósito el sistema de acondicionamiento de aire se compone de los siguientes elementos principales:

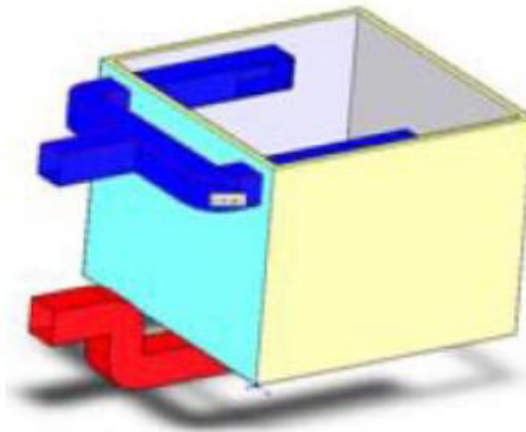
- Sistema de enfriamiento de media temperatura
- Sistema de enfriamiento de baja temperatura
- Sistema de calefacción
- Humidificador
- Deshumidificador

El espacio de trabajo implementado para la construcción de la cámara es de  $3.4\text{ m} \times 3.4\text{ m} \times 3.4\text{ m}$ . Éste espacio es esencial para tener una capacidad de evaluación de 4 refrigeradores (con una capacidad de hasta  $18\text{ ft}^3$  o  $0.51\text{ m}^3$ ), cada uno con su estación de monitoreo independiente [1].



**Figura 13 Esquema del interior de la cámara de clima controlado**

La cámara tendrá el ingreso del flujo de aire por la parte superior con dos conductos, teniendo un conducto de regreso por la parte inferior de la pared trasera como se muestra en la Figura 13



**Figura 14 Configuración de los conductos.**

En colores azul y rojo se muestran la inyección y extracción de aire respectivamente. [1]

Como se observa en la Figura 14, la cámara fue diseñada con 4 entradas de aire y un retorno centrado en la pared trasera. La selección de la configuración de los conductos entrada y salida de aire, se basó en la medida del espacio disponible y las complicaciones geométricas de los conductos; además del área transversal que debe tener el conducto para obtener una velocidad baja a la entrada de la cámara.

### **3.2 Humidificador**

El humidificador con que se cuenta es del tipo ducto isotérmico, la condición óptima de humidificación ocurre cuando el núcleo de burbujas se forma sobre la

superficie de agua caliente pero se disipan en el interior del agua antes de alcanzar la superficie de la misma.

A medida que estas burbujas calientan el agua líquida alcanza la superficie donde se lleva a cabo la interface líquido-vapor con la que la evaporación tiene lugar. Ni salpicaduras ni calor sensible es proporcionado al flujo de aire.

Algunas características de este equipo,



Humidificador Isotérmico.  
Marca: CalelecHeating  
Modelo: HR231111T03/33  
KW: 11  
Amps: 47.8  
Fases 1, Volts 230  
Capacidad Evaporativa:  
33 lbs/hr

Figura 15 Humificador Isotérmico

### 3.3 Solid Control Relay (SCR) para sistema de humidificación

El humidificador HR231111T03/33 cuenta con una resistencia eléctrica de inmersión para el calentamiento del agua, esta será controlada y energizada a través de un SCR. El SCR variará la potencia de la resistencia eléctrica de inmersión (resistencia sumergida en agua). La señal de control para la potencia de esta resistencia vendrá de una salida de corriente analógica (4-20mA) del módulo 9265 del Compact RIO que entrará a la electrónica del SCR. [1]

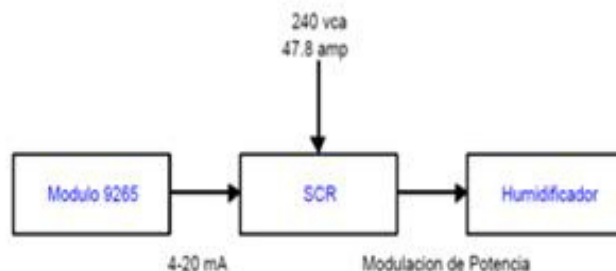


Figura 16 Circuito de Control de Humidificación y Controlador rectificador de silicio



### 3.4 Deshumidificador

Es un aparato que reduce el nivel de humedad en el aire. El ventilador del deshumidificador aspira el aire húmedo y lo pasa a través de la del evaporador, este aire se enfría. El aire frío y seco pasa a través de la condensadora donde es recalentado y enviado nuevamente al espacio exterior.

Características del equipo:



#### **Deshumidificador.**

Marca: CalelecHeating

Modelo: DEHUM-S45

Capacidad en Litros: 21

Fases 1, Volts 127

**Figura 17 Deshumidificador recomendado**

### 3.5 Compact Field Point (NI cFP-2200)

El controlador de automatización programable NI cFP-2200 para Compact FieldPoint está diseñado para aplicaciones de monitoreo industrial, control embebido y E/S distribuido. Puede crear aplicaciones completas con miles líneas de E/S analógicas y digitales, procesamiento avanzado de señales, algoritmos de simulación en tiempo real, ciclos de control PID y control de movimiento.

El NI cFP-2200 tiene un procesador en tiempo real MPC5200 Freescale de 400 MHz para despliegue determinístico y confiable y 128 MB de memoria DRAM para proyectos de análisis más grandes y avanzados. Para registro de datos embebido, el controlador contiene 128 MB de almacenamiento interno no volátil. El sistema de archivos tolerante a fallas embebido en el cFP-2200 brinda fiabilidad mejorada para sus aplicaciones de registro de datos.

Las especificaciones técnicas de la plataforma son las siguientes:

- Controlador embebido que ejecuta LabVIEW Real-Time para registro de datos, análisis y control de procesos
- Procesador de 400 MHz, 128 MB DRAM, almacenamiento no volátil de 128 MB
- Calidad industrial: 50 g de impacto, 5 g de vibración y rango de operación de -40 °C a 70 °C
- Puerto de Ethernet 10/100BASE-T con servidores embebidos de Web y archivos con interfaz de usuario de panel remoto

- Puerto serial RS232 para conexión con periféricos



**Figura 18** Controlador en Tiempo Real con 128 MB DRAM, 128 MB de Almacenamiento

### 3.6 Sensor de Humedad Relativa

Este sensor será de utilidad únicamente para monitorear la humedad relativa y punto de rocío, el rango de medición de este sensor es de 5 al 95% de humedad relativa, la salida se puede obtener en voltaje de 0 a 10 vcd. Figura 3.8



**Figura 19** Sensor HR/Punto de Rocío

Las características de este sensor de humedad son:

Marca: Omega

Modelo: HX85

Exactitud de Lectura HR: +/- 1% HR

Señal Eléctrica de Salida

0 a 10 Vcd @ 10 mA Max.

Rango de Medición de Humedad Relativa: 5 a 95%

Punto de rocío: -40 a 60°C (-40 a 140°F)

Voltaje requerido: 18 a 30 Vcd

### 3.7 Función de Transferencia

A grandes rasgos, se entiende por transformación a la sustitución de una función por otra en una ecuación. Por ejemplo la derivación es la sustitución de la función  $f(x)$  por su función derivada  $f'(x)$  que se describe como  $D[f(x)] = f'(x)$ . La función de transferencia es la relación de la transformada de Laplace de la variable de salida sobre la transformada de Laplace sobre la variable de entrada. [5]

$$G(s) = y(s)/x(s)$$

$G(s)$  = Función de Transferencia

$y(s)$  = Variable de Salida

$x(s)$  = Variable de Entrada

### 3.8 Diagrama de Bloques

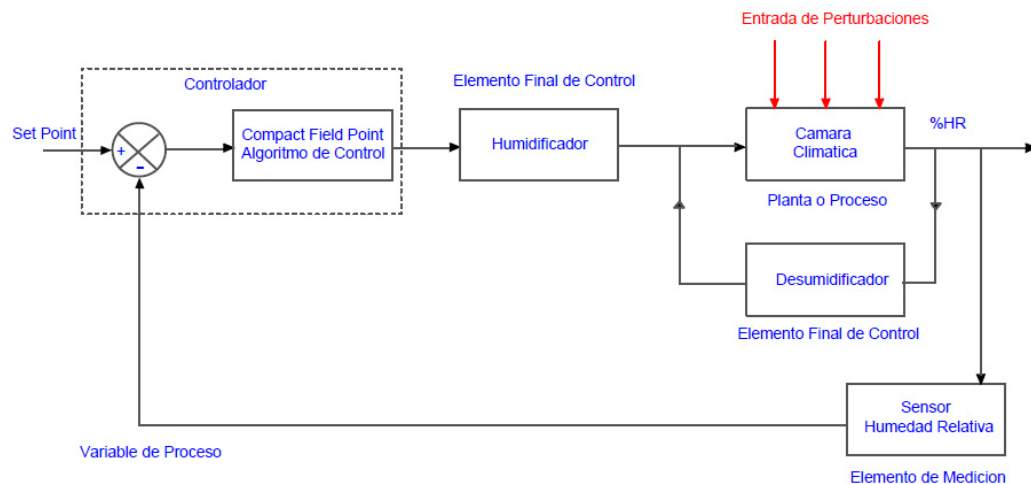
Es la representación gráfica de las funciones de transferencia por medio de diagramas de bloques en una herramienta muy útil en el control de proceso. [5]



Figura 20 Diagrama de Bloques Básico para una función de transferencia

### 3.9 Control Automático de Procesos

Para alcanzar este objetivo se debe diseñar e implementar un sistema de control como el diagrama de la figura 3.9 donde se muestra el propósito deseado de un sistema de control y los componentes del proceso de humidificación de la cámara climática. [5]



**Figura 21 Diagrama de bloques del proceso a controlar. Sistema de Lazo Cerrado.**

En el diagrama de bloques anterior se presenta cuatro componentes básicos de un sistema de control, estos son:

1. **Controlador (acción de control):** consiste en aquellos elementos de un sistema de control retroalimentado los cuales tienen por objetivo producir una acción correctiva en la variable controlada.
2. **Elemento Final de Control:** es aquel elemento quien cambia directamente el valor de la variable manipulada.
3. **Planta o Proceso:** es cualquier objeto físico que va a ser controlado
4. **Elemento de Medición (Elementos de Retroalimentación):** comunican a la acción de control ya sea el valor de la variable controlada, el error o la desviación.

### 3.10 Objetivos del Control Automático

A continuación se describen los términos que se manejan en el campo del control automático de procesos. Comenzando con estos el primero es la **variable controlada**, esta es la variable que se debe controlar dentro de un valor deseado en el proceso. Para este proceso la variable controlada es la humedad relativa dentro de la cámara climática. [7]

El segundo es la **variable manipulada**, es aquella cantidad o condición que se varía por la acción de control de manera que el valor de la variable controlada resulte afectado en la proporción debida. En el proceso de humidificación de la cámara la variable manipulada es el flujo de vapor usado para humidificar el aire el cual será variado por señal 4-20mA (0-100%) de la salida del control al humidificador. El **Set Point (SP)** es el valor que se desea

que tenga la variable controlada (variable de proceso, PV). Para la cámara climática el rango de control de humedad será de 5 a 95% de Humedad Relativa. La señal que tiende a afectar adversamente el valor de la variable controlada es conocida como **perturbación**.

Se define Error como la diferencia entre la variable de proceso (PV) y el set point (SP).

$$E = SP - PV$$

Los sistemas de control se pueden clasificar en dos grupos, los Sistemas de Control de **Lazo Abierto** y los Sistemas de Control de **Lazo Cerrado**.

- **Sistemas de Control de Lazo Abierto:** son sistemas de control en que la salida no tiene efecto sobre la acción de control, es decir en estos sistemas la salida ni se mide ni se retroalimenta para compararse con la entrada. (Figura 3.11).

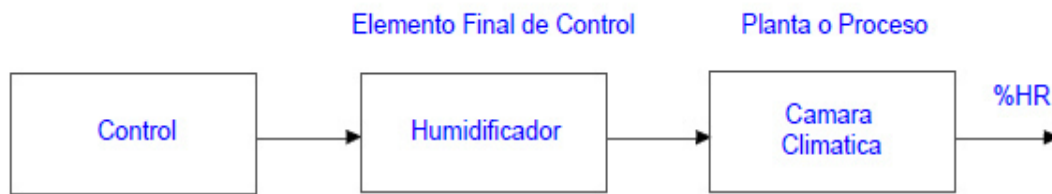


Figura 22 Diagrama de bloques de un sistema de Lazo Cerrado.

- **Sistema de Control de Lazo Cerrado** (Figura 3.10): es aquel en el que la señal de salida tiene un efecto directo sobre la acción de control, son conocidos como sistemas de control retroalimentados. La señal de error actuante, entra a la acción de control para reducir el error y llevar la salida del sistema al valor deseado.

### 3.11 Sistema de control en lazo cerrado en comparación con sistemas en lazo abierto

En un **sistema de lazo abierto** el controlador no está en función de la variable del proceso. En el control de lazo abierto no estamos preocupados de que se mantenga un valor de ajuste en particular, la salida del controlador se fija en un valor hasta que se cambie por un operador. Muchos procesos son estables en un modo de control de bucle abierto y mantendrá la variable de proceso en un valor en la ausencia de una perturbación. Las perturbaciones producen cambios incontrolados en los insumos o recursos de proceso. Para un **sistema de lazo cerrado** la salida del regulador se determina por diferencia entre el variable de proceso y el punto de consigna.

### 3.12 Sistemas de primer orden

Se le denomina sistemas de primer orden a aquellos en los que en la ecuación general aparece solamente la derivada de lado izquierdo (el de la variable de estado) [12]. Es decir se reduce a la siguiente forma:

$$\tau \left( \frac{\partial y}{\partial t} \right) + y = ku \quad (3.1)$$

Dónde:

k se denomina la ganancia del proceso.

$\tau$  es la constante de tiempo del sistema.

En general encontraremos que la ecuación está escrita en función de las variables "desviación" respecto al valor de estado estacionario por lo tanto  $y(0) = 0, u(0) = 0$ . Tomando transformadas de Laplace.

$$\tau[sY(s) - y(0)] + Y(s) = kU(s)$$

$$\tau sY(s) + Y(s) = kU(s)$$

$$(\tau s + 1)Y(s) = kU(s)$$

$$Y(s) = \frac{k}{\tau s + 1} U(s)$$

$$Y(s) = g(s)U(s)$$

$$g(s) = \frac{k}{\tau s + 1} \quad (3.2)$$

### 3.13 Tiempo muerto

El tiempo muerto (retardo de transporte o tiempo de retraso) es la respuesta de  $Y_1(s)$  a los disturbios,  $Y_1(s)$  será la misma que es  $CY(s)$  con la excepción que tiene un retardo de cierto intervalo de tiempo, es decir existe un lapso de tiempo finito entre la respuesta de  $Y_s(s)$  y la respuesta  $Y_1(s)$  lo cual se ilustra en la figura 3.12.

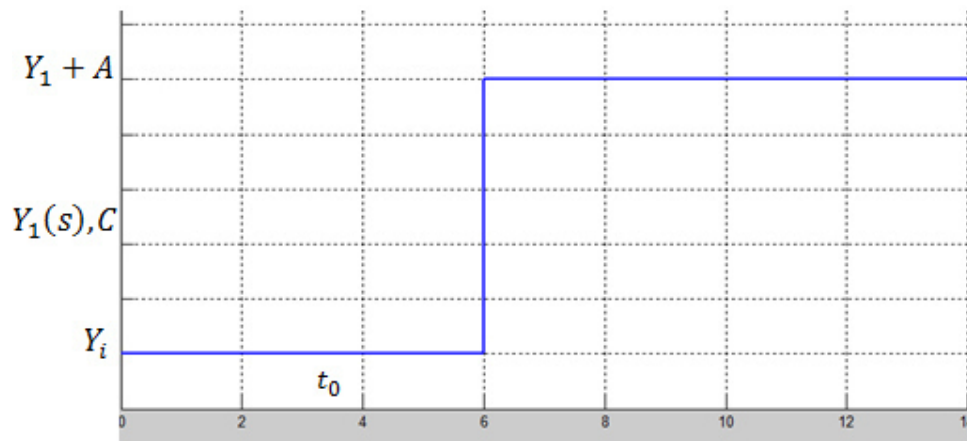


Figura 23 Tiempo muerto

Para el cambio de en escalón de la variable de entrada  $Y_i(s)$ . El intervalo entre el momento en que el disturbio entre en proceso y el tiempo en que la variable  $Y_1(s)$  empieza a responder se conoce como timo muerto, retardo de tiempo o retardo de trasporte y se representa mediante el término  $t_0$ .

El tiempo muerto es parte integral el proceso y consecuentemente se debe de tomar en cuenta en las funciones de transferencia que relacionan  $Y_1(s)$  con  $Y_i(s)$  y  $Y_s(s)$ . La función de retardo se expresa mediante el producto de la ecuación de trasferencia por el término de la trasformada de Laplace del puro tiempo muerto que es:  $e^{-t_0s}$ . [12]

Por lo que la ecuación de trasferencia con tiempo muerto nos queda:

$$\frac{Y_1(s)}{Y_i(s)} = \frac{K_1 e^{-t_0s}}{\tau s + 1} \quad (3.3)$$

### 3.14 Constante de tiempo

Si se supone que la variable dependiente  $Y(s)$  se incrementa hasta el valor  $A$ , sufre un cambio de escalón de la magnitud de  $A$  y se expresa matemáticamente como:

$$Y_i(t) = Y_i \quad t > 0$$

$$Y_i(t) = Y_i + A \quad t > 0$$

Lo que se puede expresar:

$$Y_i(t) = Au(t)$$

Al obtener la trasformada de Laplace se tiene:

$$Y_i(s) = \frac{A}{s} \quad (3.4)$$

Y al sustituirlo en la ecuación 67 considerando que la ganancia es 1 nos queda:

$$Y(s) = \frac{A}{s(\tau s + 1)} \quad (3.5)$$

Y al utilizar las fracciones parciales para obtener la transformada inversa la ecuación queda como:

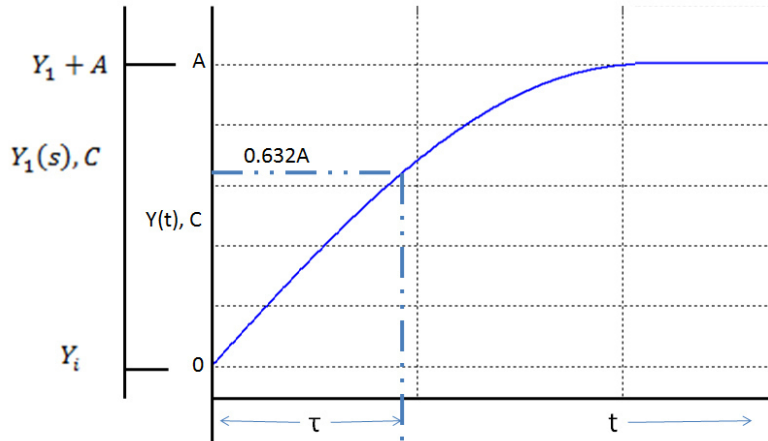
$$Y(s) = A \left( 1 - e^{-t/\tau} \right) \quad (3.6)$$

Esta ecuación 76 expresa el significado físico de  $\tau$ , la cual se conoce como *constante de tiempo del proceso*. Si se hace  $t = \tau$ , se tiene:

$$Y(s) = A \left( 1 - e^{-t/\tau} \right) = A \left( 1 - e^{-1} \right) \quad (3.7)$$

$$Y(t) = 0.634A$$

Es decir, en una constante de tiempo se alcanza el 63.2% del cambio total lo cual se ilustra gráficamente en la siguiente figura. [12]



**Figura 24 Respuesta de un proceso de primer orden a un cambio en escalón de la función de forzamiento-constante de tiempo**

En consecuencia, la constante de tiempo guarda relación con la velocidad de respuesta del proceso. Mientras más lenta es la respuesta de un proceso a la función de forzamiento o entrada, más grande es el valor de  $\tau$ ; por lo tanto, más rápida es la respuesta del proceso a la función de forzamiento, cuanto más pequeño es el valor de  $\tau$ .

Se debe de tener en cuenta que la constante de tiempo se compone con las diferentes propiedades físicas y parámetros de operación del proceso.

### 3.15 Ganancia

La ganancia es un parámetro relacionado con la personalidad del proceso que se está controlando y en consecuencia depende de las propiedades físicas y los parámetros que se controlan. [12]

Matemáticamente la ganancia se puede definir como:

$$\frac{\Delta \text{Variables\_de\_salida}}{\Delta \text{Variables\_de\_entrada}} = \frac{Y(s)}{U(s)} \quad (3.8)$$

Y se representa con la variable  $K$  por lo que si retomamos la ecuación 3.5 y se agrega la ganancia nos quedará:



$$Y(s) = \frac{KA}{s(\tau s + 1)} \quad (3.9)$$

La ganancia multiplica al cambio en la función de forzamiento, por lo tanto la ganancia indica cuánto cambia la variable de salida por unidad de cambio de forzamiento o variable de entrada. Es decir la ganancia define la sensibilidad del proceso.

### 3.16 Control PID

El Control PID proporciona una salida del regulador que modula de 0 a 100% en respuesta al error.

Como controlador PID proporciona una salida del controlador de modulación, el control PID requiere elementos finales de control que puedan aceptar una serie de variables de control, como la posición de la válvula o la velocidad de la bomba.

La ventaja de control PID es la capacidad de operar el proceso con el más mínimo error (sin banda muerta) con menos desgaste de los elementos de control final.

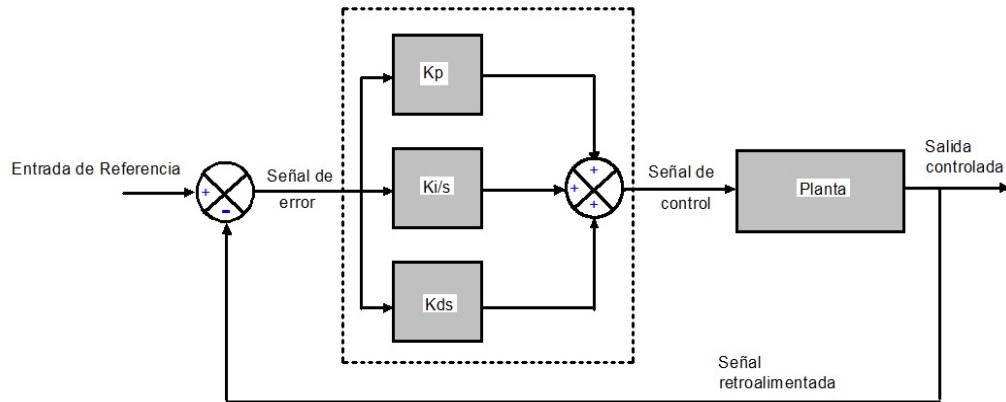
#### 3.16.1 Acción de Control Proporcional-Integral-Derivativa

El objetivo del sistema de control automático de proceso es utilizar la variable manipulada para mantener a la variable controlada en el punto de control a pesar de las perturbaciones.

El control Proporcional-Integral-Derivativo (PID) es un método de control lineal tradicional usado en muchas aplicaciones. El algoritmo del controlador del PID es ampliamente usado por las tareas de la industria de la automatización y en las aplicaciones del confort termodinámico para el calentamiento y enfriamiento donde el error, la derivada del error y la integral del error son usados en los cálculos de la ley de control. [8]

El controlador PID es la suma de los elementos proporcional, integral y derivativo.

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3.10)$$



**Figura 25 Diagrama de bloques del PID**

**Control Proporcional (P):** la salida (señal de control  $s$ ) es directamente proporcional a la entrada (señal de error  $e$ ) donde  $s=k_p \cdot e$ , donde  $k_p$  es una constante que se denomina ganancia proporcional. Así la señal de control depende únicamente del error en cada instante de tiempo. Por lo tanto la función de transferencia es  $G(s)=S/E=k_p$ . De esta forma el controlador proporcional funciona como un amplificador del valor de la señal de error. Así los valores de señal de error grandes producen valores de salidas de control grandes. [8]

**Control Integral (I):** la salida es proporcional a la integral de la entrada en el tiempo. Es decir  $s=k_i \int e dt$ , siendo  $k_i$  una constante que se denomina ganancia integral. La integral entre 0 y  $t$  de  $e$  es el área de la función  $e$  entre 0 y  $t$ . Así la salida del controlador (señal de error) es proporcional a la acumulación de los errores de los instantes de tiempos anteriores. Por lo tanto la función de transferencia será  $G(s)=S(s)/E(s)=k_i/s$ , puesto que  $S(s)=k_i \cdot E(s)/s$ . De esta manera en los controladores integrales, la salida depende de la señal de error y del tiempo durante el que la señal de salida mantiene la desviación respecto a la entrada de referencia. [8]

**Control Derivativo (D):** la salida es proporcional a la derivada de la entrada. Es decir, es proporcional a la razón de cambio de la señal de error:  $s=k_d \cdot de/dt$ , donde  $k_d$  es una constante que se denomina ganancia derivativa. Por lo tanto, la función de transferencia es  $G(s)=S(s)/E(s)=k_d s$ , ya que  $S(s)=k_d s E(s)$ . [8]

la salida (señal de control  $s$ ) es directamente proporcional a la entrada (señal de error  $e$ ) donde  $s=k_p \cdot e$ , donde  $k_p$  es una constante que se denomina ganancia proporcional. Así la señal de control depende únicamente del error en cada instante de tiempo. Por lo tanto la función de transferencia es  $G(s)=S/E=k_p$ . De esta forma el controlador proporcional funciona como un amplificador del valor de la señal de error. Así los valores de señal de error grandes producen valores de salidas de control grandes. [8]

**Control Integral (I):** la salida es proporcional a la integral de la entrada en el tiempo. Es decir  $s=ki \int e dt$ , siendo  $ki$  una constante que se denomina ganancia integral. La integral entre 0 y  $t$  de  $e$  es el área de la función  $e$  entre 0 y  $t$ . Así la salida del controlador (señal de error) es proporcional a la acumulación de los errores de los instantes de tiempos anteriores. Por lo tanto la función de transferencia será  $G(s)=S(s)/E(s)=ki/s$ , puesto que  $S(s)=ki \cdot E(s)/s$ . De esta manera en los controladores integrales, la salida depende de la señal de error y del tiempo durante el que la señal de salida mantiene la desviación respecto a la entrada de referencia. [8]

**Control Derivativo (D):** la salida es proporcional a la derivada de la entrada. Es decir, es proporcional a la razón de cambio de la señal de error:  $s=kd \cdot de/dt$ , donde  $kd$  es una constante que se denomina ganancia derivativa. Por lo tanto, la función de transferencia es  $G(s)=S(s)/E(s)=kds$ , ya que  $S(s)=kdsE(s)$ . [8]

### 3. 17 Ajuste mediante criterios de minimización de índices de funcionamiento

Como ya se ha visto, un proceso se puede expresar con una ecuación de transferencia de la forma de primer orden:

$$G_p(s) = \frac{K_p e^{-\theta s}}{\tau s + 1} \quad (3.11)$$

Y para obtener los parámetros adecuados de sintonización del modelo matemático del PID se utilizó el método de criterios integrales. Este método de la Universidad del Estado de Lousiana se realizó un proyecto substancial de investigación bajo la dirección de los profesores Paul W. Murril y Cecil L. Smith, para desarrollar relaciones de ajuste únicas. Con la finalidad de caracterizar al proceso, utilizaron parámetros de modelos de primer orden más tiempo muerto (POMTM), la especificación de la respuesta, en lazo cerrado es un error o desviación mínima de la variable controlada respecto al Set Point o punto de control. Debido a que el error está en función del tiempo que dura la respuesta, la suma del error en cada instante de tiempo se debe minimizar; esa suma es, por definición, la integral del error en función del tiempo y se representa mediante el área sombreada de la figura 3.13 Como la integral del error trata de minimizar mediante la utilización de las relaciones de ajuste, éstas se conocen como ajuste del error de integración mínimo; sin embargo, la integral de error no se puede minimizar de manera directa, ya que un error negativo muy grande se volvería mínimo. Para evitar los valores negativos en la función de desempeño, se propone el planteamiento de la siguiente integral: [12]

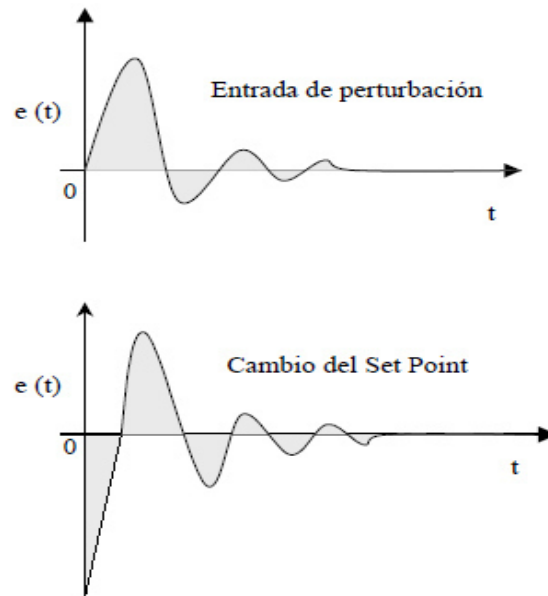


Figura26 Integrales del Error para cambios en la perturbación y en el Set Point.

### 3. 17.1 Integral del valor absoluto del error (IAE)

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (3.12)$$

### 3.17.2 Integral del cuadrado del error (ICE)

$$ICE = \int_0^{\infty} [e(t)^2] dt \quad (3.13)$$

Las integrales comienzan desde el momento en que ocurre la perturbación o cambio en el Set Point ( $t = 0$ ), hasta un tiempo muy largo ( $t = \infty$ ), debido a que no se puede de antemano predecir la duración de las respuestas. El único problema con esta definición de la integral, es que se vuelve indeterminada cuando no se fuerza el error a cero, lo cual ocurre únicamente cuando no hay acción de integración en el controlador, debido a la desviación, o el error de estado estacionario; en este caso, en la definición se reemplaza el error por la diferencia entre la variable controlada y su valor final de estado estacionario.

La diferencia entre el criterio *IAE* y el *ICE*, consiste básicamente en que con el *ICE* se tiene más ponderación para errores grandes, los cuales se presentan generalmente al inicio de la respuesta, y menor ponderación para errores pequeños, los cuales se presentan al final de la respuesta. Para tratar de reducir el error inicial, el criterio de *ICE* mínima da por resultado una ganancia alta del controlador y respuestas muy oscilatorias, es decir, con un amortiguamiento alto, en las cuales el error oscila alrededor del cero por un tiempo relativamente largo. De este fenómeno se deduce que en tal criterio de

desempeño debe existir una compensación para el tiempo que transcurre desde el inicio de la respuesta. En las siguientes integrales de error se incluye dicha compensación mediante la ponderación del tiempo transcurrido. [12]

### 3.17.3 Integral del valor absoluto del error ponderado en tiempo (IAET)

$$IAET = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (3.14)$$

### 3.17.4 Integral del cuadrado del error ponderado en tiempo (ICET)

$$ICET = \int_0^{\infty} t [e(t)^2] dt \quad (3.15)$$

López et al. [12], desarrollaron fórmulas de sintonización para criterios de error de integración mínima en las que se asume que la función de transferencia del proceso para perturbaciones de entrada es idéntica a la función de transferencia que se presenta a la salida del controlador. Las fórmulas de sintonización son presentadas en la tabla 3.1

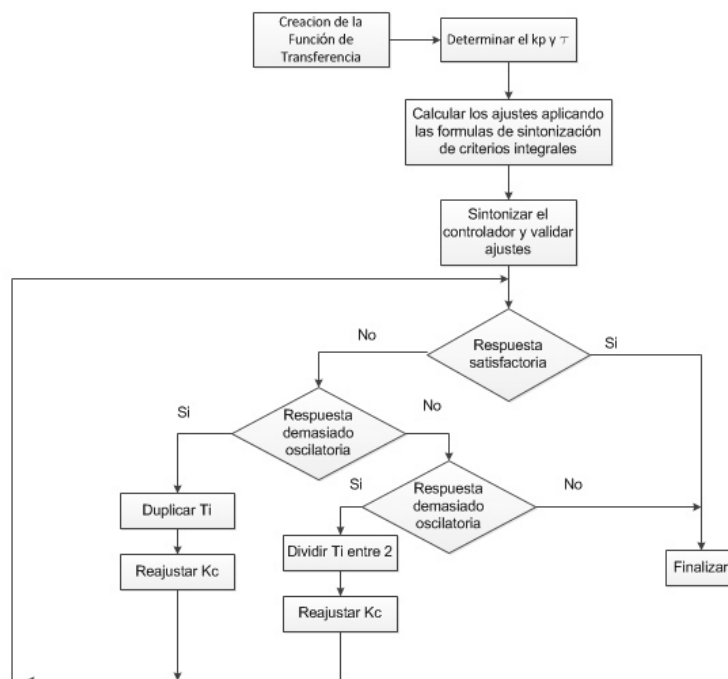
Controlador	Parámetro	ICE	IAE	IAET
Proporcional (P)	$k_c = \frac{a}{K} \left( \frac{t_0}{\tau} \right)^b$	a=1.411 b=-0.917	a=0.902 b=-0.985	a=0.490 b=-1.084
Proporcional + Integral (PI)	$k_c = \frac{a_1}{K} \left( \frac{t_0}{\tau} \right)^{b_1}$	a1=1.305 b1=-0.959	a1=0.984 b1=-0.986	a1=0.859 b1=-0.977
	$\tau_i = \frac{\tau}{a_2} \left( \frac{t_0}{\tau} \right)^{b_2}$	a2=0.492 b2=-0.739	a2=0.608 b2=-0.707	a1=0.674 b1=-0.680
Proporcional + Integral + Derivativo (PID)	$k_c = \frac{a_1}{K} \left( \frac{t_0}{\tau} \right)^{b_1}$	a1=1.495 b1=-0.945	a1=1.435 b1=-0.921	a1=1.357 b1=-0.947
	$\tau_i = \frac{\tau}{a_2} \left( \frac{t_0}{\tau} \right)^{b_2}$	a2=1.101 b2=-0.771	a2=0.878 b2=-0.749	a2=0.842 b2=-0.738
	$\tau_d = a_3 \tau \left( \frac{t_0}{\tau} \right)^{b_3}$	a3=0.560 b3=1.006	a3=0.482 b3=1.137	a3=0.381 b3=0.995

**Tabla 1 Fórmulas de Sintonización para Integración Mínima en presencia de perturbaciones de entrada.**

En sistemas de control avanzados, tales como los autoajustables se utilizan estos métodos de manera automática para mejorar la respuesta del sistema de control. [12]

### 3.18 Metodología para el desarrollo del bloque de control con PID

Con la teoría descrita de control, el bloque básico de nuestro sistema es construido mediante la siguiente forma aquí descrita en la figura 3.16.

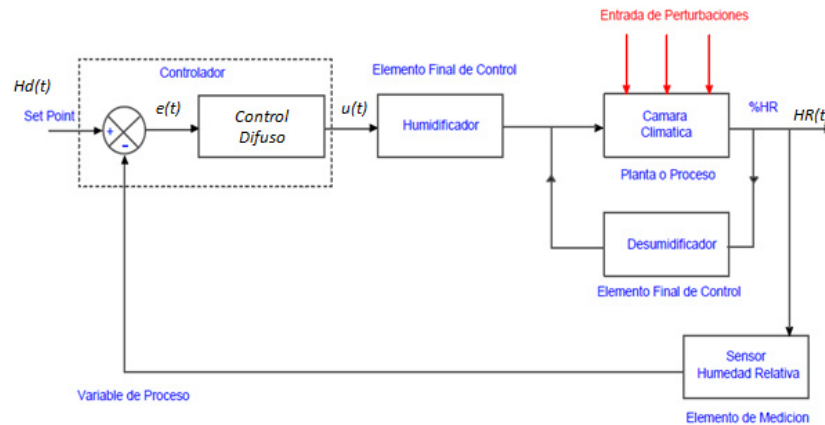


**Figura 27 Metodología a seguir para el control PID del proceso de humidificación para la cámara climática.**

### 3.19 Control Difuso (Fuzzy Logic Control)

La lógica difusa ha ganado un gran campo de acción en procesos difíciles de modelar matemáticamente, ya que el diseño y sintonización del controlador difuso se basa únicamente en la experiencia del experto en el proceso. Es decir, a través de la lógica difusa se incorpora el razonamiento humano en el algoritmo de control y simplifica el diseño de controlador. [13]

El problema de control de humidificación de la cámara climática se define mediante el siguiente diagrama de bloques:



**Figura 28 Diagrama de bloques de control para humidificación para la cámara climática.**

Notación	Descripción
$H_d(t)$	Humedad deseada. Rango de 0-10vcd (5-95%HR)
$H(t)$	Humedad sensada en la cámara climática. Rango de 0-10vcd (5-95%HR)
$E(t)$	Error [ $H_d(t) - H(t)$ ]
$u(t)$	Salida del controlador a la planta. Rango de operación 4-20mA

Los controladores difusos son reguladores no-lineales. Por medio de la selección adecuada de funciones de pertenencia y del establecimiento de una base de reglas se pueden compensar no-linealidades en el sistema de regulación de procesos. Las funciones de pertenencia son modelos matemáticos para los términos lingüísticos, como por ejemplo. Las funciones de pertenencia triangulares, trapezoidales o gaussianas.

Como en el caso de un control convencional, en el control difuso se transforman variables

de entrada en variables de salida, que actúan en el proceso o en el sistema de control. Múltiples variables de entrada y salida se pueden enlazar entre sí de forma que sistemas complejos se pueden regular fácilmente. Los valores de entrada y salida son valores exactos en forma de señales.

La imprecisión típica de los métodos difusos desempeña un papel sólo dentro del regulador.

El controlador difuso genérico se presenta en el diagrama de bloques de la figura 3.18. Es común el diseño de controladores difusos genéricos debido a que generalmente tienen la misma forma de diseño, independientemente del proceso que se desee controlar. La diferencia es la sintonización de las reglas del controlador difuso y esto se hará de acuerdo como se mencionó anteriormente, a la experiencia del operador humano.

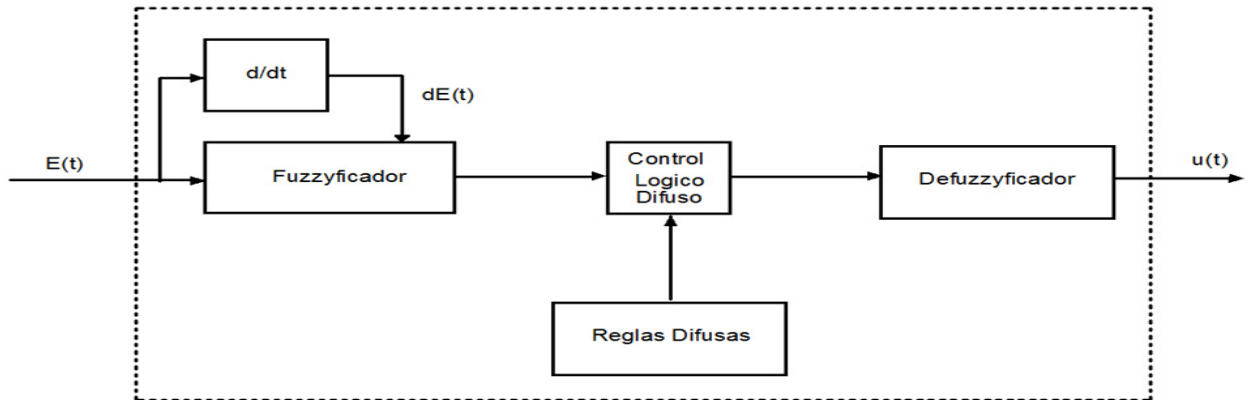


Figura 29 Diagrama de bloques de controlador difuso genérico.

### 3.19 Lógica Difusa (Fuzzy Logic). Introducción

La incorporación de la lógica difusa a los sistemas de control da lugar a lo que se llama sistemas de control difuso. Como se indicó anteriormente, cotidianamente nos movemos en un mundo con definiciones ambiguas, si alguien dice “esta húmedo” nos interesa saber en qué medida esto es cierto. La toma de decisión a partir de información que no especifica también es un procedimiento cotidiano, esto es lo que se intenta emular con lógica difusa a partir de la observación del entorno, la formulación de reglas lógicas y de los mecanismos de toma de decisión.

En la presente sección se verán los conceptos básicos de lógica difusa que se aplican en control, tales son conjuntos difusos, funciones de membrecía, reglas, defusificación y los pasos para la toma de decisión.

#### 3.19.1 Definiciones usadas en el Fuzzy Logic

Para entender un sistema Fuzzy se necesita aclarar los términos siguientes [13]:

**Función de pertenencia:** Define a un conjunto Fuzzy mapeando entradas abruptas de su dominio hasta a su grado de pertenencia. Para nuestro sistema de humidificación de la cámara climática tenemos como funciones de pertenencia humedad Baja, Media, Alta.

**Grado de Pertenencia:** grado al cual una entrada abrupta es compatible con una función de pertenencia, el cual puede tomar valores dentro de un valor determinado entre 0 y 1.

**Etiqueta:** nombre descriptivo usado para identificar una función de pertenencia. Para nuestro sistema tenemos humedad Baja, Media y Alta.

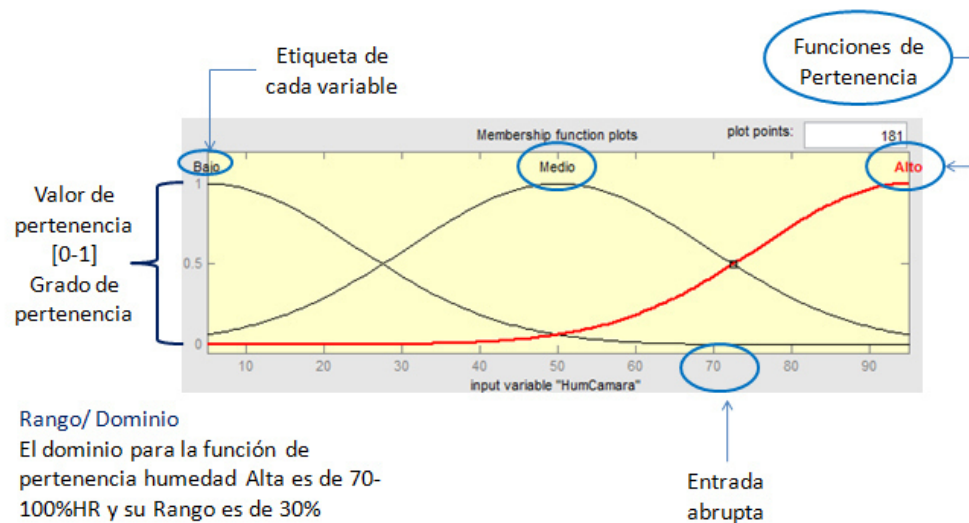


Entradas abruptas: **Diferentes valores discretos de la variable del sistema, para nuestro proceso tenemos los valores medidos del porcentaje de humedad relativa (0-100%HR).**

**Rango/Dominio:** Intervalo sobre el cual una función de pertenencia es mapeada. El dominio de la función de pertenencia de humedad Alta es de 50-100%HR.

**Universo de Discurso-Rango:** de todos los valores posibles de la variable del sistema (humedad relativa del 0 al 100%HR).

**Funciones de Membresía:** Las funciones de Membresía representan el grado de pertenencia de un elemento a un subconjunto definido por una etiqueta.



**Figura 30 Términos Lingüísticos para la variable Humedad en la cámara.**

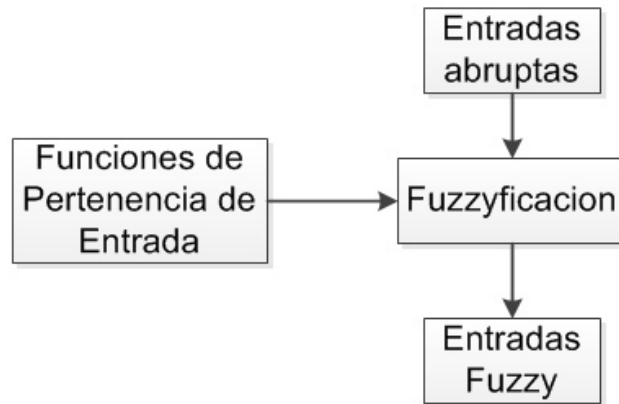
### 3.19.2 Etapas de un sistema Fuzzy

Un sistema Fuzzy consta de 3 etapas [13]:

- Fuzzyficación
- Reglas de evaluación
- Defuzzyficación

#### 3.19.2.1 Etapa de Fuzzyficación

Esta etapa calcula el grado de pertenencia que podría tener una entrada abrupta a una o varias funciones de pertenencia de una variable, el resultado se denomina entrada Fuzzy. El procedimiento puede representarse como en la figura 3.20.



**Figura 31 Etapa de Fuzzyficación.**

Para transformar las entradas abruptas en entradas Fuzzy primero se debe determinar las funciones de pertenencia de la variable. Una vez realizado esto, la entrada abrupta es comparada con la función de pertenencia correspondiente produciendo valores de entrada Fuzzy.

El proceso de Fuzzyficación en el sistema de humidificación para la cámara climática en donde el control Fuzzy tendría por finalidad la de controlar la humedad relativa dentro de la cámara climática dependiendo de la medición de la humedad relativa dentro de la cámara. Este sistema estaría básicamente construido por dos variables de entrada (Humedad de referencia y Humedad en cámara)

El primer paso sería plantear y asignar dentro del universo a discutir etiquetas a cada variable. Así para la variable de entrada Humedad en cámara se asignara las siguientes etiquetas:

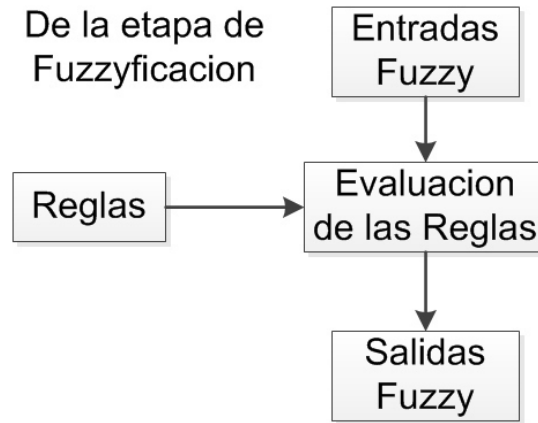
Humedad en cámara: Baja, Media, Alta.

Mientras que para el caso de la variable de Humedad de referencia las etiquetas son:

Humedad de referencia: B, M, A

### **3.19.2.2 Reglas de Evaluación**

En la segunda etapa del procesamiento de la lógica Fuzzy, la llamada regla de evaluación o de inferencia Fuzzy, el controlador Fuzzy usa reglas lingüísticas sobre los resultados que fueron generados en la etapa de Fuzzyficación (denominados entradas Fuzzy). El procedimiento puede representarse como en la figura 3.21



**Figura 32 Etapa de Reglas de Evaluación.**

Las reglas Fuzzy son sentencias Si-Entonces (*if-then*) que describen la acción a ser tomada en respuesta a varias entradas Fuzzy. Las reglas están confirmadas a un predefinido conjunto de términos lingüísticos y cuya sintaxis es la siguiente:

If Antecedente 1 And Antecedente 2.... Then consecuente 1 And consecuente 2....

Donde And es uno de los operadores de la lógica Fuzzy. El antecedente tiene el siguiente formato:

Variable de entrada = Etiqueta [la humedad en la cámara (variable) es baja (etiqueta)]

El consecuente está en la forma de:

Variable de salida = Etiqueta [la humedad de salida (variable) es humedecer (etiqueta)]

Las reglas siguen el sentido común del comportamiento del sistema y son estrictos en términos de las etiquetas de funciones de pertenencia.

Para el sistema propuesto de humidificación de la cámara climática con dos entradas y una salida, las reglas pueden ser representadas por la siguiente tabla 3.2 donde se observan las etiquetas de variables de entrada humedad en la cámara “HumCamara” y humedad de referencia “HumRef” así como la variable de salida de humedad “SalidaHumedad”

Existe una gran variedad de tipos de reglas, dos grandes grupos son los que en general se emplean, las reglas Difusas de Mamdani y las reglas Difusas de Takagi-Sugeno. Para este trabajo se utiliza las reglas de Mamdani.

**Reglas Difusas de Mamdani:** If  $x_1$  A and  $x_2$  B and  $x_3$  is C then  $u_1$  is D,  $u_2$  is E.

Donde  $x_1$ ,  $x_2$  y  $x_3$  son las variables de entrada (por ejemplo, error, derivada del error y derivada segunda del error), A,B y C son funciones de Membresía de entrada (por ejemplo humedad baja, media y alta),  $u_1$  y  $u_2$  son las acciones de control (por ejemplo Humedecer, Nada, Secar) en sentido genérico son todavía variables lingüísticas (todavía no toman valores numéricos), D y E son las funciones de Membresía de salida, y “And” y “Not” son operadores lógicos difusos. La primera parte de la sentencia If  $x_1$  A and  $x_2$  B and  $x_3$  is C es el antecedente y la restante es el consecuente. [14]

#### **Ventajas de este Método de Mamdani:**

- Es intuitivo
- Tiene una amplia aceptación
- Está bien adaptado a la incorporación de conocimiento y experiencia

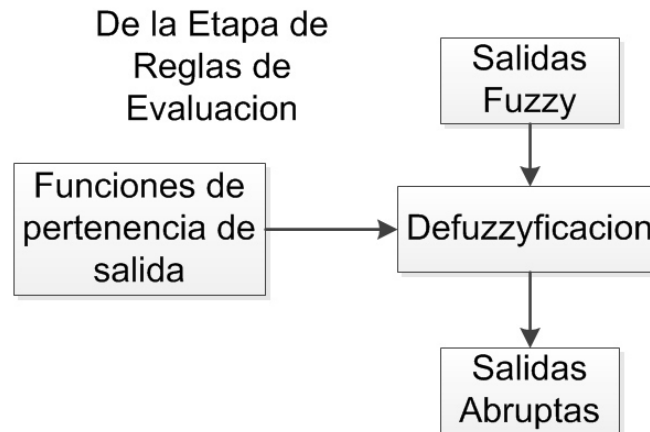
# Regla	Entradas				Salida	
1	if	HumCamara es Bajo	And	HumRef es M	Then	SalidaHumedad es Humedecer
2	if	HumCamara es Medio	And	HumRef es M	Then	SalidaHumedad es Nada
3	if	HumCamara es Alto	And	HumRef es M	Then	SalidaHumedad es Secar
4	if	HumCamara es Bajo	And	HumRef es B	Then	SalidaHumedad es Nada
5	if	HumCamara es Medio	And	HumRef es B	Then	SalidaHumedad es Secar
6	if	HumCamara es Alto	And	HumRef es B	Then	SalidaHumedad es Secar
7	if	HumCamara es Bajo	And	HumRef es A	Then	SalidaHumedad es Humedecer
8	if	HumCamara es Medio	And	HumRef es A	Then	SalidaHumedad es Humedecer
9	if	HumCamara es Alto	And	HumRef es A	Then	SalidaHumedad es Nada
10	if	HumCamara es Bajo	And	HumRef no es B	Then	SalidaHumedad es no Secar
11	if	HumCamara es Medio	And	HumRef no es M	Then	SalidaHumedad no es nada
12	if	HumCamara es Alto	And	HumRef no es A	Then	SalidaHumedad no es Humedecer

**Tabla 2 Reglas propuestas para el sistema de humidificación de la cámara climática.**

#### **3.19.2.3 Defuzzyficación**

En la Defuzzyficación el procedimiento de cálculo se representa como en la figura 3.22, en donde el objetivo final consiste en encontrar las salidas abruptas, para esto cada salida Fuzzy, las que fueron encontradas en la etapa de reglas de evaluación, modificaran a su respectiva función de pertenencia de salida.

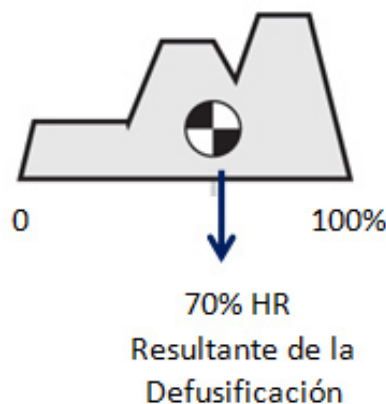
Las etiquetas para estas funciones de salida hacen referencia a la salida de humedad del humidificador en la cámara climática es decir son Secar, Nada y Humedecer.



**Figura 33 Etapa de Defuzzyficación.**

Los métodos más comunes en la Defusificación son: Método de la media ponderada, Método de Centro de Masa (Centro de Gravedad o Centroide), Método Singleton. El método más popular es el Método de Centro de Masa o Centroide.

**Método de Centro de Masa (Centro de Gravedad o Centroide):** en este método se determina el centro de gravedad del conjunto de salida resultante de la unión de las contribuciones de todas las reglas válidas. El valor de salida es la abscisa del punto del centro de gravedad. Este trabajo utiliza el Editor de Fuzzy Logic Toolbox de Matlab el cual emplea este método de Defuzzyficación de Centro de Masa (Centroide). [14]



**Figura 34 Salida de la Etapa de Defuzzyficación por el Método de Centroide**

En este método de Centroide cada función de pertenencia de salida son cortadas en el nivel indicado por su respectiva salida Fuzzy. Las funciones de

pertenencia cortadas resultantes son luego combinadas para calcular su centro de gravedad. Las salidas Fuzzy que fueron calculadas en la etapa anterior.

**Diagrama de Fuzzy Inference:** Este diagrama es el esquema de todos los diagramas de las entradas y salidas que componen al sistema que se esté elaborando. [14]

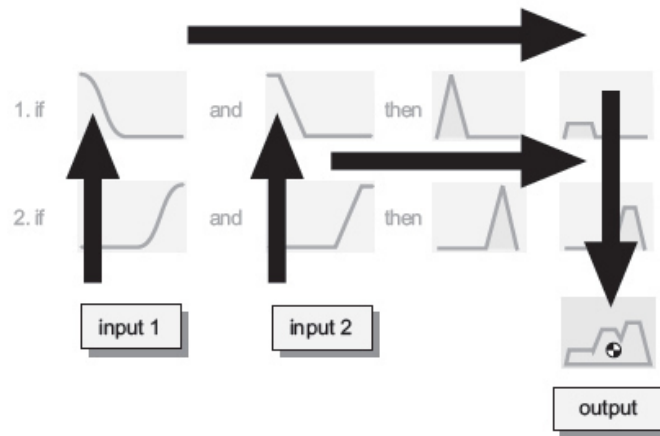


Figura 35 Inference Fuzzy diagrama.

### 3.20 Matlab y Simulink

**MATLAB** (abreviatura de *MATrix LABoratory*, "laboratorio de matrices") es una herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje de programación propio. En la industria, *MATLAB* se utiliza para investigación y para resolver problemas prácticos de ingeniería y matemáticas, con un gran énfasis en aplicaciones de control y procesamiento de señales. *MATLAB* también proporciona una serie de soluciones específicas denominadas *TOOLBOXES*. Estas son muy importantes para la mayoría de los usuarios de *MATLAB* y son conjuntos de funciones *MATLAB* que extienden el entorno *MATLAB* para resolver clases particulares de problemas como:

- Procesamiento de señales
- Diseño de sistemas de control
- Simulación de sistemas dinámicos
- Identificación de sistemas
- Redes neuronales y otros.

El lenguaje de computación técnica MATLAB es una ambiente de computación integrada que combina computación numérica, gráficos, informes o simulación, MATLAB lo lleva ahí. **El lenguaje flexible e interactivo de MATLAB permite a ingenieros y científicos expresar sus ideas técnicas con simplicidad.**

Los poderosos y amplios métodos de cómputo numérico y de grafica permiten la prueba y exploración de ideas alternativas con facilidad, mientras que el

ambiente de desarrollo integrado facilita producir resultados prácticos fácilmente.

MATLAB es la fundación numérica y gráfica para todos los productos de “The MathWorks”. MATLAB combina computación numérica, gráficos 2D y 3D y capacidades de lenguaje en único ambiente fácil de usar.

**Simulink** es un entorno de programación visual, que funciona sobre el entorno de programación de MATLAB. Es un entorno de programación de más alto nivel de abstracción que el lenguaje interpretado Matlab (archivos con extensión .m). Simulink genera archivos con extensión .mdl (de “model”).

Simulink viene a ser una herramienta de simulación de modelos o sistemas, concierto grado de abstracción de los fenómenos físicos involucrados en los mismos. Se hace énfasis en el análisis de sucesos, a través de la concepción de sistemas (cajas negras que realizan alguna operación).

Simulink es un paquete de software que se ejecuta acompañando a Matlab para modelar, simular y analizar sistemas dinámicos. Funciona sobre Matlab, para iniciar Simulink es necesario entrar antes a Matlab. Ambos programas están desarrollados y comercializados por The MathWorks Inc.

Simulink puede simular cualquier sistema definido por ecuaciones diferenciales continuas y ecuaciones diferenciales discretas. Esto significa que se puede modelar sistemas continuos en el tiempo, discretos en el tiempo o sistemas híbridos.

Simulink puede trabajar con:

Sistemas lineales y no lineales

Sistemas en tiempo continuo, muestreados o un híbrido de los dos.

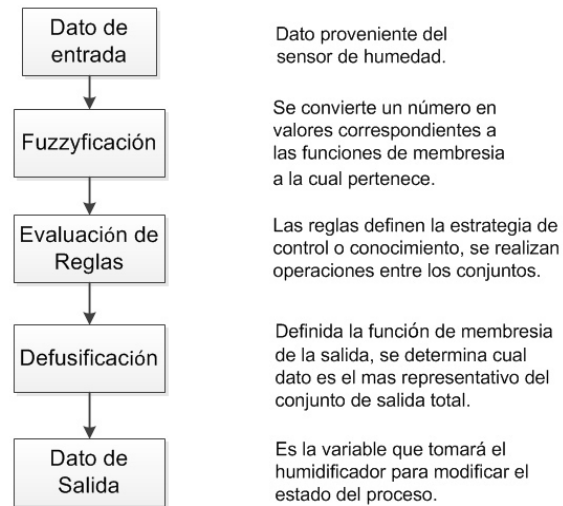
En Simulink podemos encontrar una amplia biblioteca de bloques de sumideros, fuentes, componentes lineales y no lineales y conectores. También podemos personalizar y crear nuestros propios bloques.

### **3.21 Fuzzy Logic Toolbox (Simulink/Matlab)**

Fuzzy Logic Toolbox (FLT) es un producto de The MathWorks para el entorno Matlab. La FLT es una ampliación del entorno de desarrollo Matlab para el diseño de sistemas basados en lógica difusa. Ofrece un entorno gráfico muy sencillo para el desarrollo de este tipo de sistemas paso a paso. Esta Toolbox facilita el diseño de las reglas y la selección de las funciones más utilizadas en lógica difusa. Las principales características de FLT son: interfaces graficas sencillas para la definición de variables, edición de funciones de pertenecía, descripción de reglas y visualización de las reglas activadas. Además la FLT puede utilizarse de manera independiente o conjunta al entorno de desarrollo Simulink (también para Matlab), orientada a la simulación de sistemas dinámicos.

### 3.22 Metodología para el Proceso del Bloque del Fuzzy Logic para el Acondicionamiento de la Cámara

Los pasos a seguir para la evaluación de los datos para la creación de nuestro bloque de Fuzzy Logic se describen en el siguiente diagrama de flujo:



**Figura 36 Metodología del bloque de Fuzzy Logic para el proceso de humidificación.**



# Capítulo 4

## Diseño y Simulación del Algoritmo de Control de Humedad

### 4.1 Visión general del diseño

En este capítulo se analiza cuanto tiempo se requiere para humidificar el volumen o espacio de la cámara climática tomando en cuenta el flujo másico del humidificador con el que se cuenta descrito en el capítulo 4 formando así la función de transferencia del sistema.

La Función de Transferencia generada sirvió para la construcción del sistema de control del proceso de humidificación de la cámara y mediante ellos se desarrolla el algoritmo de control haciendo uso del modelo PID y Fuzzy Logic (Lógica Difusa) los cuales serán capaces de llevar al punto de consigna deseado de humedad y mantener el control en el interior de la cámara climática.

Para crear este algoritmo se utilizó la función de transferencia para analizar el comportamiento dinámico del sistema con respecto al tiempo obteniendo así los valores requeridos como el tiempo de proceso ( $T_p$ ), tiempo muerto ( $\theta$ ) y la ganancia del proceso ( $k_p$ ) para crear el modelo matemático de control del PID por medio de criterios integrales, usando este modelo se pudo proceder a crear una primera simulación haciendo uso del Simulink el cual es muy visual a la hora de simular porque permite un diseño en bloques y subsistemas lo cual nos da una forma más sencilla de entender el funcionamiento del sistema de control creado.

Ya una vez creado la función de transferencia del sistema y el modelo de control PID, se procedió a usar el Fuzzy Logic Toolbox para crear el control lógico difuso, en este editor del Fuzzy Logic se declaran las entradas y salidas del sistema además se generan las reglas de control para la lógica del proceso las cuales ayudaran al sistema llevar a su punto de consigna requerido. Para la creación de estas reglas usadas en nuestro modelo de Fuzzy Logic dependen mucho del conocimiento del proceso a controlar.

Ya con el sistema de Fuzzy Logic desarrollado se procede a simular el modelo en conjunto con la función de transferencia del sistema y se compara el

comportamiento de este contra el modelo de la función de transferencia con PID.

A continuación se explicara de forma más detallada los cálculos y modelos que forman este diseño y su funcionamiento para crear nuestro algoritmo de control para la humidificación de la cámara climática.

#### 4.2 Sensor y Transmisor de Humedad Relativa (HR)

Iniciamos con la construcción de la función de transferencia del sensor de humedad, el sensor de HR está diseñado para un rango de 5-95% de Humedad Relativa con una señal eléctrica de salida de 0 a 10vcd. Por medio de la ecuación de la recta obtenemos lo siguiente:

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{10 - 0}{95 - 5} = \frac{10}{90}$$

$$m = 0.11 \text{ v} / \%HR \quad (4.1)$$

$$y = mx + b$$

$$0 = 0.11(5) + b$$

$$0 = 0.55 + b$$

$$b = -0.55 \quad (4.2)$$

$$y = mx + b$$

$$v = 0.11 \frac{\text{v}}{\%HR} HR - 0.55 \quad (4.3)$$

De la Ecuación 5.3 obtenemos la ecuación de la recta (5.4)  
Esta es la ecuación lineal para representar la relación proporcional de la HR medida del sensor y la señal de voltaje que entrega al controlador.

$$\%HR = 9.09 \frac{HR}{v} (v) + 5HR \quad (4.4)$$

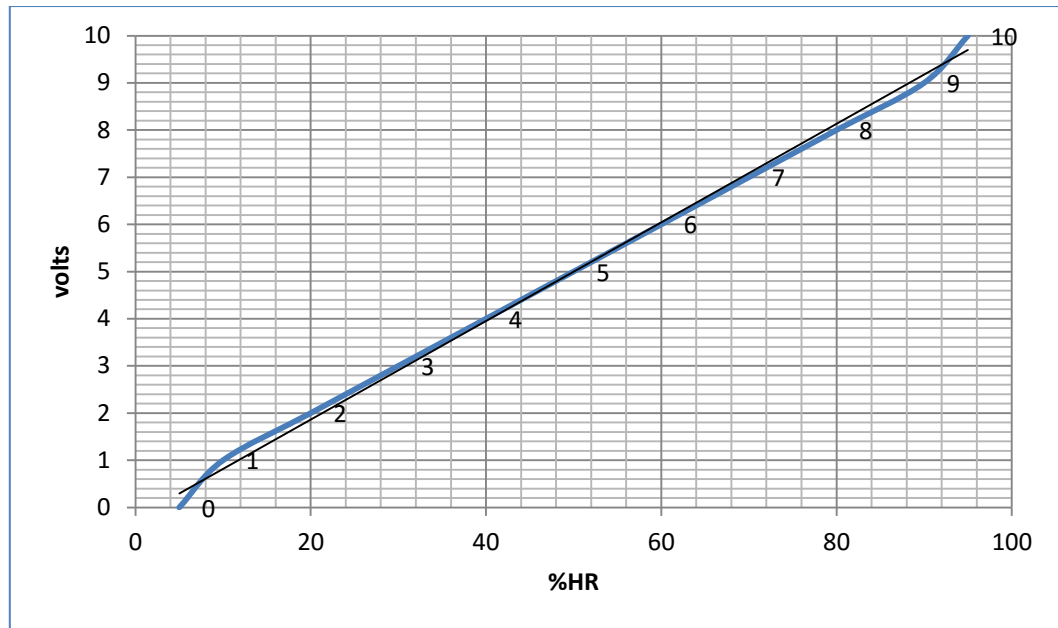


Figura 37 Función de transferencia del sensor de humedad

#### 4.3 Análisis matemático del proceso a humidificar

Analizamos matemáticamente en cuanto tiempo nuestro humidificador puede hacer llegar a un 100% de humedad relativa el volumen de  $39.30\text{m}^3$  de nuestra cámara climática, esta información nos servirá más adelante para poder construir nuestra función de transferencia del sistema la cual representara el comportamiento dinámico con respecto al tiempo de nuestra variable a controlar (el porcentaje de humedad relativa).

En la cámara climática el aire seco es de  $46.77\text{kgm}$  con una densidad de  $1.19\text{kg/m}^3$  esto obtenido del cálculo siguiente:



$$\rho = \frac{m}{v}$$

$$1.19 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = \frac{m_a}{v}$$

$$m_a = \left( 1.19 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) (39.30\text{m}^3)$$

$$m_a = 46.77\text{kg}$$

Figura 38 El volumen de la cámara es de  $39.30\text{m}^3$

El humidificador de nuestro proceso proporciona un flujo másico de 33 lbm/hr (0.004166 kgm/seg); en 100 segundos tenemos una masa de 0.4166 kg de aire húmedo, con este dato del fabricante obtenemos la humedad específica ( $w$ ) de la siguiente forma:

$$w = \frac{m_v}{m_a}$$

$$w = \frac{0.4166 \text{ kg}_{H_2O}}{46.77 \text{ kg}_{\text{aire}_\text{seco}}}$$

$$w = 8.98 \times 10^{-3} \text{ kg}_{H_2O} / \text{kg}_{\text{aire}_\text{seco}}$$



**Figura 39** Flujo másico de 33lbm/hr

Necesitamos saber la presión del aire seco y la presión del vapor, utilizaremos la siguiente ecuación

$$P = P_a + P_v$$

Para la presión saturada del agua usamos la tabla de agua saturada y tomamos el valor de la presión a 25°C la cual es  $P_g = 3.1698 \text{ kpa}$  y la presión del aire seco a 25°C es de 100kpa.

$$P_g (P_{\text{sat}_a_T})$$

$$P_a_{25^\circ C}$$

$$P_g = 3.1698 \text{ kpa}$$

$$P_a = 100 \text{ kpa}_{a_{25^\circ C}}$$

Para obtener la presión de vapor la calculamos usando la siguiente ecuación:

$$\omega = 0.622 \frac{P_v}{P_a}$$

$$P_v = \frac{(8.9 \times 10^{-3})(100 \text{ kpa})}{0.622}$$

$$P_v = 0.01431 \text{ kpa}$$

Ya con esta información podemos calcular la presión total,

$$P = P_a + P_v$$

$$P = 100 \text{ kpa} + 0.01431 \text{ kpa}$$

$$P = 100.0143 \text{ kpa}$$

Con la humedad específica y la presión total obtenida calculamos la Humedad Relativa (f):

$$\phi = \frac{\omega P}{(0.622 + \omega) P_g}$$

$$\phi = \frac{(8.9 \times 10^{-3})(100 \text{ kpa})}{(0.622 + 8.9 \times 10^{-3})(3.1698 \text{ kpa})}$$

$$\phi = 0.445$$

$$\phi = 44.5\%$$

La humedad relativa que nos proporciona nuestro humidificador es de 44.5% en 100 segundos, así que mediante una regla tres simple tenemos que a 224 segundo tenemos 100%HR.

#### **4.4 Modelo empírico del proceso de humidificación.**

Al haber analizado nuestro sistema tenemos que en 100 segundos nuestro humidificador nos proporciona 44.5% de humedad relativa, para alcanzar el 100%HR dentro de nuestro volumen de espacio en nuestra cámara climática tomamos 227 segundos.

Estos 227 segundos es el tiempo de proceso ( $T_p$ ) que le lleva al sistema llegar desde 0% al 100%HR por lo tanto nuestra constante de tiempo es de 56.75 segundos.

Para el cálculo de la ganancia tomaremos la variable de salida (%HR) entre la salida del controlador (señal de 0 a 100%).

$$k_p = \frac{\Delta y}{\Delta u} = \frac{95 - 5}{100 - 0}$$

$$k_p = 0.9$$

Encontrando las constantes del modelo empírico del proceso de humidificación observamos que las variables de nuestro proceso son las siguientes:

$$k_p = 0.9$$

$$\tau_p = 56.75$$

La siguiente función de transferencia representa el modelo de primer orden de respuesta para la humidificación de la cámara.

$$G_p(s) = \frac{K_p}{\tau s + 1} \quad G_p(s) = \frac{0.9}{56.75s + 1}$$

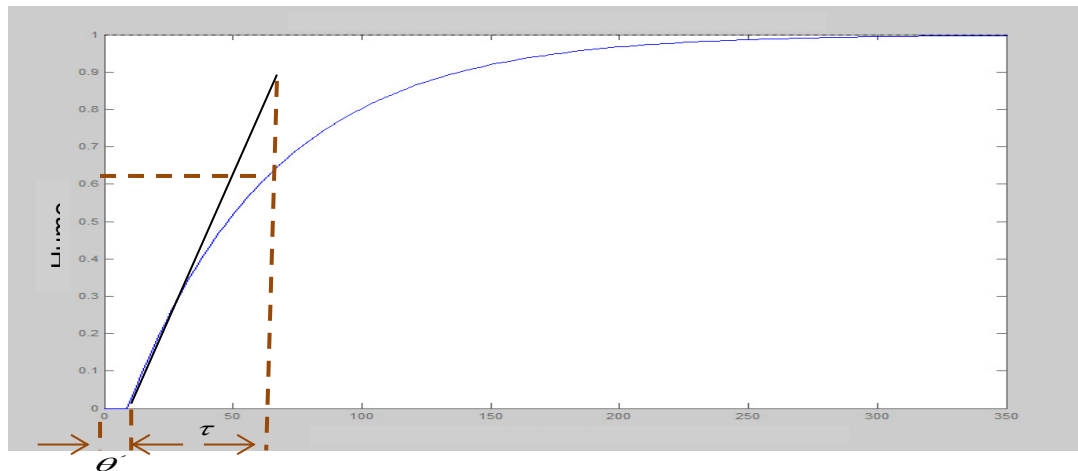
## 4.5 Identificación con Matlab del sistema de primer orden con retardo

### 4.5.1 Método de la Tangente de Ziegler y Nichols

El primer método de identificación propuesto como parte de un procedimiento de sintonización de controladores fue desarrollado por Ziegler y Nichols. Aunque estos autores no supusieron que el sistema a identificar fuera auto-regulado, esto es que la respuesta del sistema tendía a un valor finito, su procedimiento de identificación puede utilizarse para obtener un modelo de primer orden más tiempo muerto. El procedimiento requiere que se trace una recta tangente a la curva de reacción del proceso en su punto de inflexión o de máxima pendiente, como se muestra en la Figura 5.8

Para la aproximación del proceso a un modelo de primer orden con tiempo muerto se traza en la curva de reacción del proceso la línea tangente de máxima pendiente hasta intersectarse con la horizontal correspondiente al valor último de la respuesta. La intersección de esta tangente con el eje horizontal determina los parámetros de tiempo muerto y constante de tiempo.

La Función de Transferencia nos proporciona el siguiente modelo de primer orden con tiempo muerto:



**Figura 40** Curva de respuesta de primer orden del proceso de humidificación

Esta curva de reacción del proceso muestra las constantes del modelo empírico del proceso de humidificación. Observamos que las variables de nuestro proceso son las siguientes:

$$k_p = 0.9$$

$$\tau = 56$$

$$\theta' = 9$$

#### 4.6 Sintonía por Criterios Integrales (Control Regulatorio)

Ya conociendo las variables del proceso ( $k_p$ ,  $T_p$  y  $\theta$ ) usando la función de transferencia de primer orden con tiempo muerto desarrollada se procede al cálculo de las ganancias para el controlador con las cuales haremos el ajuste de la señal de nuestro modelo del PID.

Los parámetros para el modelo de primer orden con tiempo muerto son:

$$k_p = 0.9 \quad \tau = 56.75 \quad \theta' = 9$$

$$G_p(s) = \frac{0.9e}{56.75s + 1}$$

Los parámetros de ajuste con criterio integrales de error para entrada de perturbaciones se pueden calcular con las formulas de la tabla 3.1

Controlador PID

$$K_c = \frac{a_1}{K_p} \left( \frac{\theta_p'}{\tau_p} \right)^{b_1} \quad \tau_i = \frac{\tau_p}{a_2} \left( \frac{\theta_p'}{\tau_p} \right)^{b_2}$$

$$K_c = \frac{1.435}{0.9} \left( \frac{9.31}{56.75} \right)^{-0.921} \quad \tau_i = \frac{56.75}{0.878} \left( \frac{9.31}{56.75} \right)^{0.749}$$

$$K_c = 8.44 \quad \tau_i = 16.69$$

$$\tau_d = a_3 \tau_p \left( \frac{\theta_p'}{\tau_p} \right)^{b_3}$$

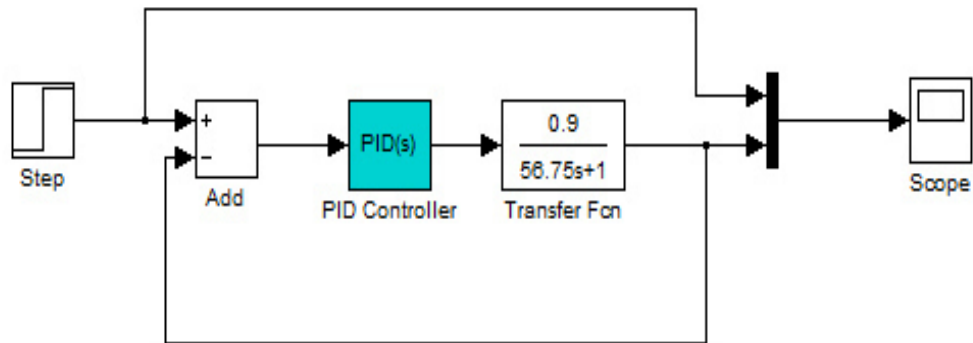
$$\tau_d = (0.482)(56.75) \left( \frac{9.31}{56.75} \right)^{1.137}$$

$$\tau_d = 3.50$$

Modelo del PID Ideal

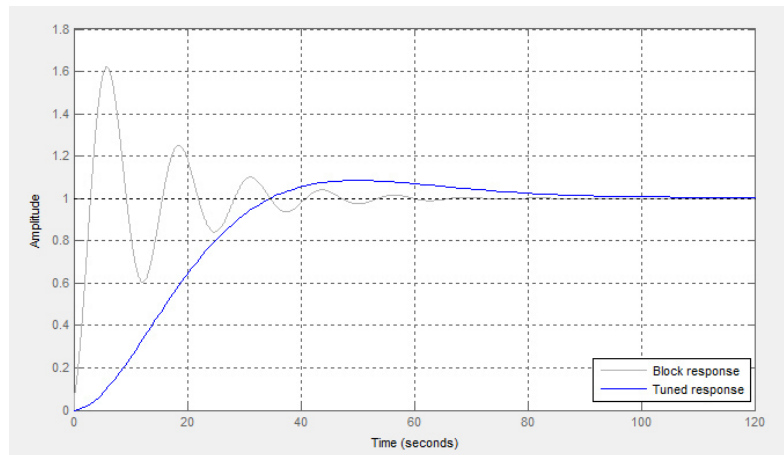
$$G_c(s) = K_c \left[ 1 + \frac{1}{\tau_{is}} + \tau_{Ds} \right] \quad G_c(s) = 8.44 \left[ 1 + \frac{1}{16.69} + 3.50 \right]$$

Este modelo de PID generado para el sistema es simulado usando Matlab/Simulink y obtenemos la siguiente respuesta: Ver figura 5.9



**Figura 41 Diagrama de bloques de función de transferencia con PID simulado en Simulink**





**Figura 42** Curva de respuesta del bloque de la función de transferencia con el control PID

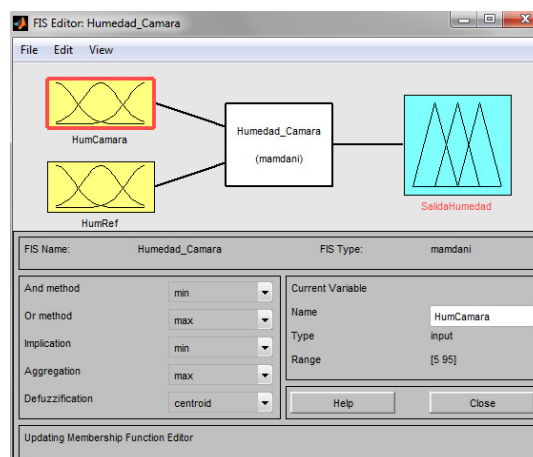
La respuesta del bloque de la función de transferencia (**línea gris**) de nuestro sistema se muestra en esta grafica de la figura 5.10 la cual tiene un comportamiento oscilatorio antes de llegar a nuestro punto de consigna a diferencia de nuestra respuesta sintonizada (**línea azul**) con nuestro PID que muestra una tendencia más lineal y estable.

## 4.7 Fuzzy Logic Control (Control Lógico Difuso)

### 4.7.1 Desarrollo del Bloque de Control Difuso de Humedad usando Fuzzy Logic ToolBox de Matlab

Para crear un controlador difuso, hay que llamar la función Fuzzy desde la línea de comandos de Matlab.

#### Creación en el Editor de Inputs (entradas) y Outputs (salidas)



**Figura 43** Editor de Inputs y Outputs

Planteamos nuestras entradas y salida del control lógico difuso a crear, estos serán las Funciones de Membrecía de nuestro control difuso.

Entrar a los cuadros amarillos y azul y editar.

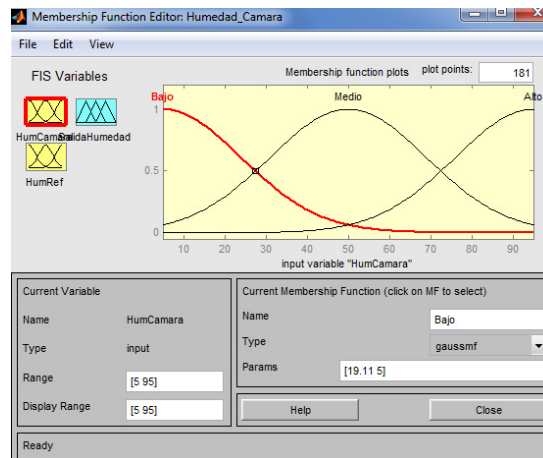
#	input	Membership Function			Range	Params
1	HumCamara	Bajo	Medio	Alto	5-95%	5-95%
2	HumRef	B	M	A	5-95%	5-95%

#	output	Membership Function			Range	Params
1	SalidaHum	Secar	Nada	Humedecer	5-95%	5-95%

**Tabla 3 Funciones de Membrecía a usar en nuestro FLC**

A continuación se desarrollara el diseño del Fuzzy de Humedad que se ha llevado a cabo para este estudio de la parte de humedad.

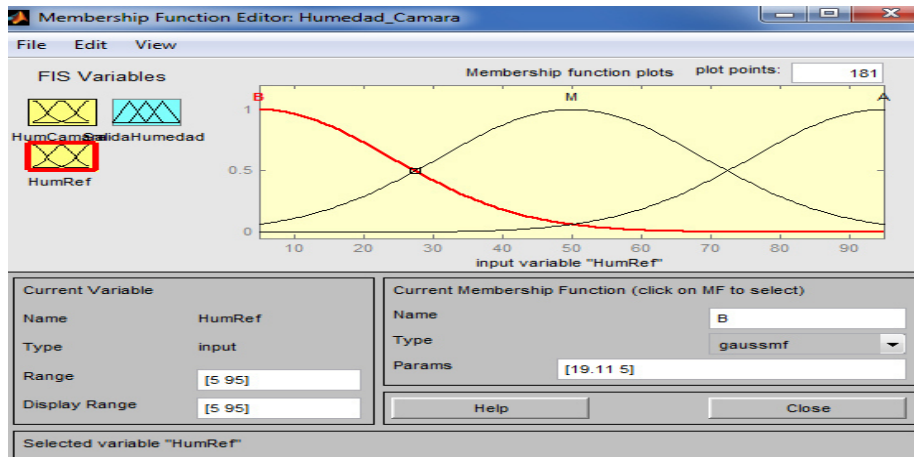
Lo que se muestra en la figura 5.12 es la constitución de la primera variable de entrada del Fuzzy, “HumCam” (humedad interna en la cámara), creado para la parte del estudio dedicado a la humedad dentro de la cámara.



**Figura 44 Funciones de la variable de entrada “HumCam”**

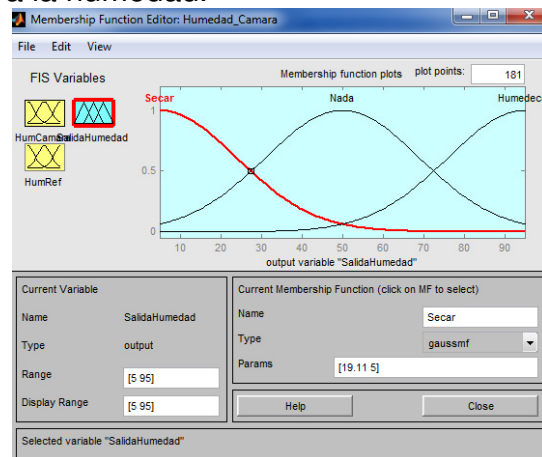
Lo que se va a estudiar es la humedad relativa, y el rango de esta humedad relativa en la cámara es de 5-95 %HR. Esta variable está compuesta por 3 funciones con forma gaussianas “Bajo”, “Medio” y “Alto”. Esta variable define el rango humedad que podría darse en la cámara climática.

Realmente la variable que va a ser que se limite ese rango sería “**HumRef**”. La siguiente variable de entrada al Fuzzy de humedad es la de la figura 5.13 y sería la entrada que representa la referencia de la parte de humedad del estudio.



**Figura 45 Funciones de la variable de entrada “HumRef”**

Esta variable de entrada al control difuso es muy importante porque realmente es la que limita el rango de acción del Fuzzy. Los valores del rango de funcionamiento de esta variable serán en el intervalo de 5-95%HR. También la estructura de esta variable sería igual que la anterior, tiene 3 funciones “B”, “M” y “A” que corresponderían a los valores bajos, medios y altos dentro del rango de referencia. La variable representada en la figura 5.14 es la variable de salida del control difuso para la humedad.

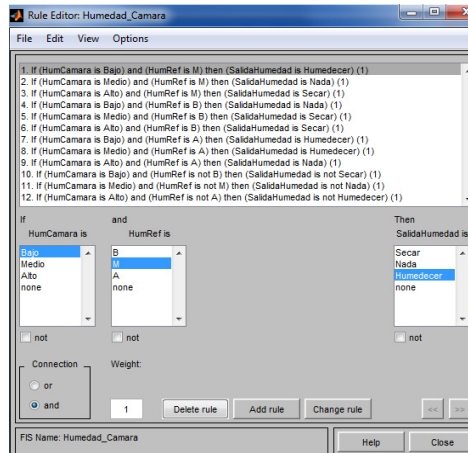


**Figura 46 Funciones de la variable de salida “SalidaHumedad”**

En la figura 5.14 está representada la variable de salida del Fuzzy de humedad “**SalidaHumedad**”, con un rango de salida que se ha puesto de [5-95] %HR. También esta variable posee 3 funciones internas: secar, nada y humedecer, con forma gaussianas. Dependiendo del valor de entrada que se tenga en el Fuzzy, a la salida los valores que se generarían tendrían el rango propuesto, si el número es negativo significaría que el control debería secar el ambiente de la cámara porque habría mucha humedad. Si el valor de salida queda próximo a cero pues el control no actuaría porque eso significaría que en la entrada los valores son cercanos y estarían dentro del rango requerido.

En cambio si el valor es positivo significaría que habría que humedecer el ambiente porque estaría bastante seco en la cámara. Esta será la lógica de

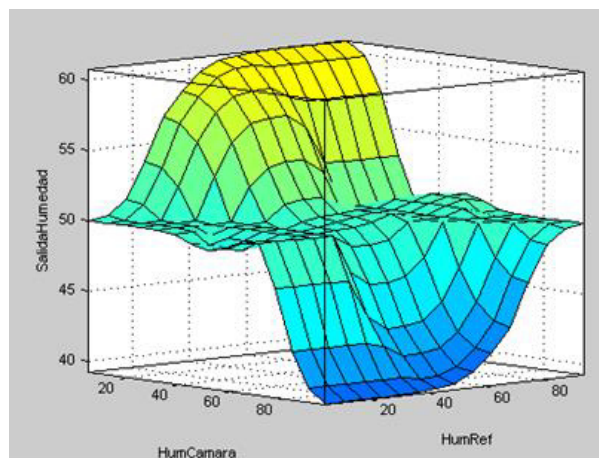
funcionamiento y esto se consigue gracias a las reglas de interacción que se han escrito y que se muestran a continuación.



**Figura 47**Reglas de interacción del Fuzzy de humedad

En la figura 5.15 está representada la ventana del control difuso donde se redactan las reglas de interacción del controlador. Como se tiene 2 variables de entrada y una de salida, se han realizado 12 reglas, entre las cuales se ha querido conseguir cubrir todas las posibilidades de relación entre las variables del Fuzzy para que este funcione lo mejor posible.

La interacción que tienen nuestras dos entradas y salida está representada por la gráfica 3D (figura 3.16) de superficie que generarían las reglas hechas anteriormente.



**Figura 48**Grafico 3D que representa la interacción entre las dos entradas y la salida a nuestro FLC

# Capítulo 5

## Simulaciones y Resultados

### 5.1 Introducción

Utilizando el Matlab/Simulink se plantean los lazos cerrados de control propuestos para la humidificación de la cámara climática utilizando el modelo PID generado y el sistema de Lógica Difusa planteada para esta aplicación.

Se analiza el comportamiento dinámico del modelo de la función de transferencia del proceso de humidificación, así mismo a este modelo se le aplica el PID generado para este proceso.

Se presenta el controlador difuso (Fuzzy Logic Control) a implementar y el resultado será contrastado con los del modelo de control PID.

Con estas simulaciones se pretende aplicar lo expuesto hasta el momento.

### 5.2 Metodología de simulaciones

Para el desarrollo del control térmico del proceso de humidificación se construyen diferentes lazos cerrados de control donde se incluyen cada uno de los modelos matemáticos creados para el proceso de humidificación.

Se inicia con el modelado de la planta de este proceso hasta llegar a los modelos con PID y Fuzzy Logic (Lógica Difusa).

#### 5.2.1 Respuesta en Lazo Cerrado de la Planta a Controlar

Se inicia corriendo la primera simulación de la planta (función de transferencia) y se observa el comportamiento dinámico contra el tiempo de esta función del proceso de humidificación sin controladores.

Salida inicial: 0  
Escalón: 25

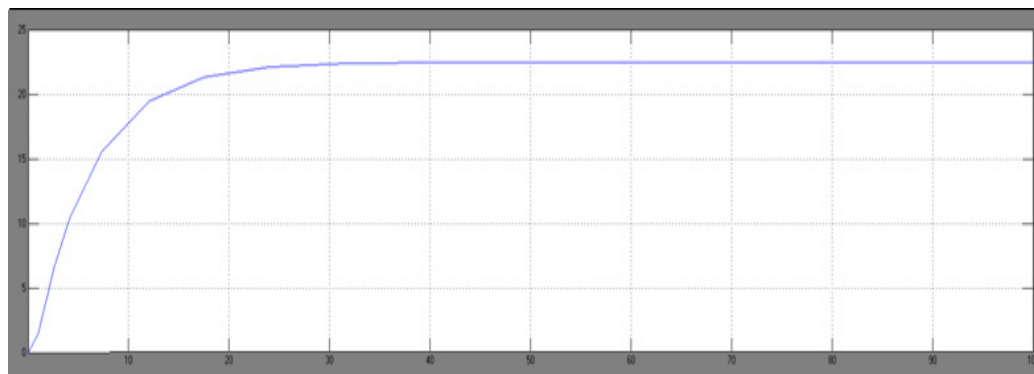
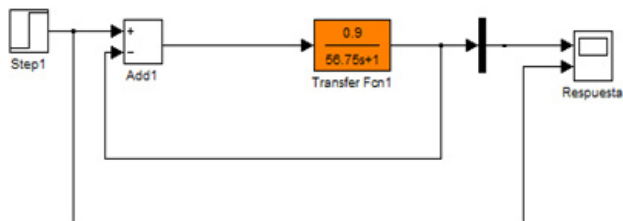


Figura 49 Lazo cerrado de la planta a controlar.

La curva de reacción llega a un valor de 22%HR no alcanzando el set point indicado de 25%HR en la función escalón.

### 5.2.2 Lazo de Control con PID

A nuestra planta del proceso de humidificación se le anexa el modelo PID construido y sintonizado el cual se corre con un escalón del 25%HR.

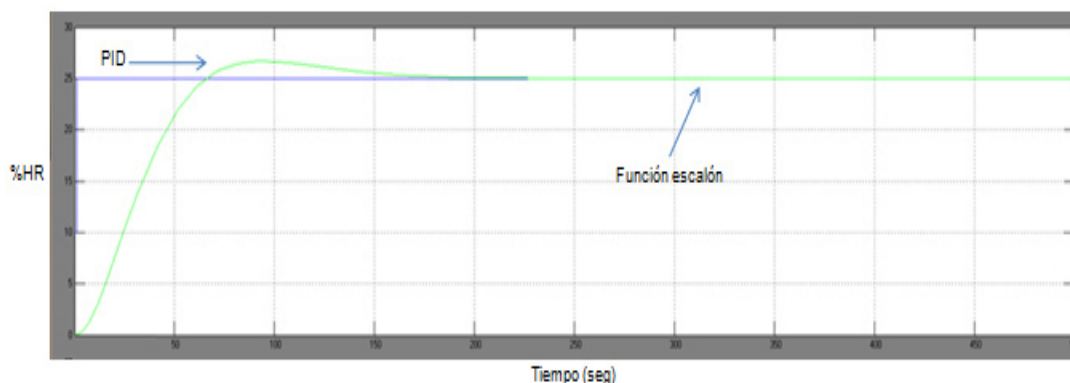
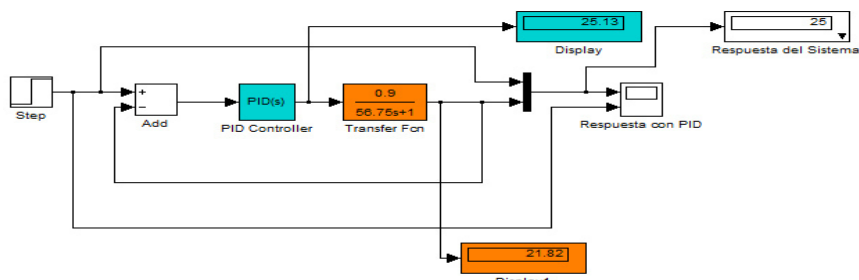
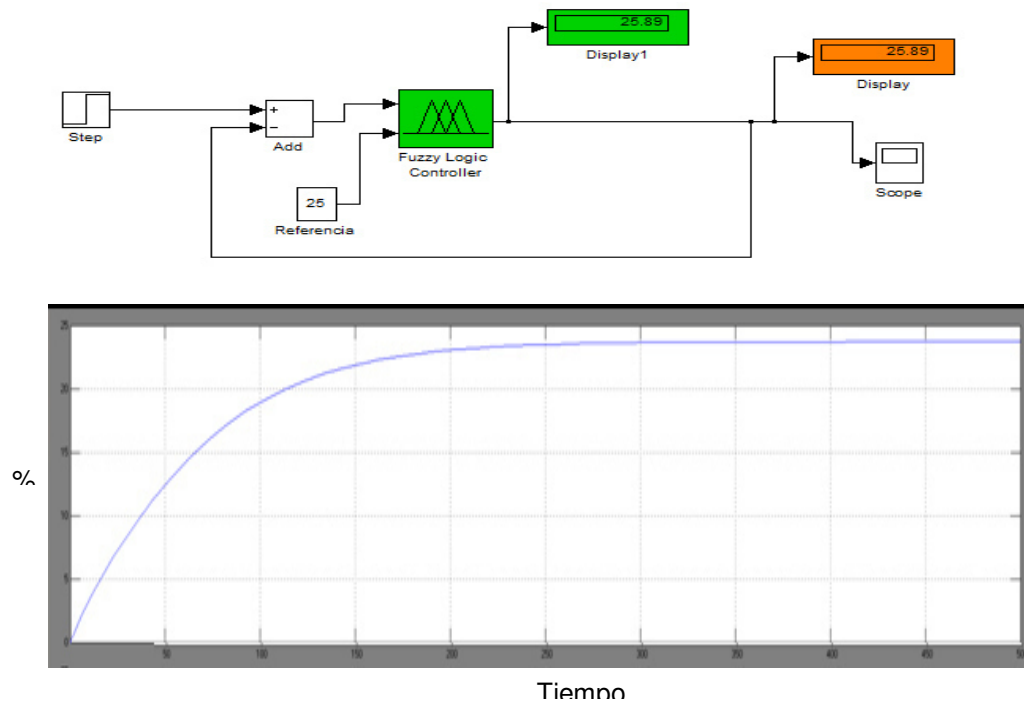


Figura 50 Respuesta del controlador PID.

En este lazo de control se observa como el PID ayuda a la planta a llegar a su punto de consigna de 25%HR tomando estabilidad en un tiempo de 230 segundos.

### 5.2.3 Bloque de Control Difuso

Se manda llamar el bloque de control difuso creado y este es corrido en el cual se observa que el valor numérico arrojado por este es de 25.89% de HR vs. 25% de HR de consigna.



**Figura 51** Respuesta del controlador PID.

### 5.2.4 Lazo de Control Difuso

En este lazo de control se emplea el bloque de control difuso junto con la planta indicando en la función escalón 20% de HR dando como respuesta este arreglo un resultado de 20.25%HR.

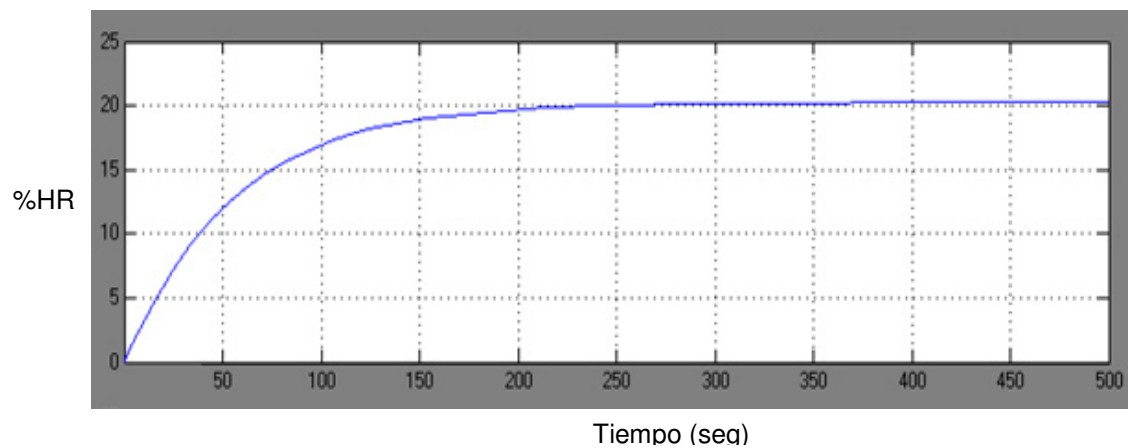
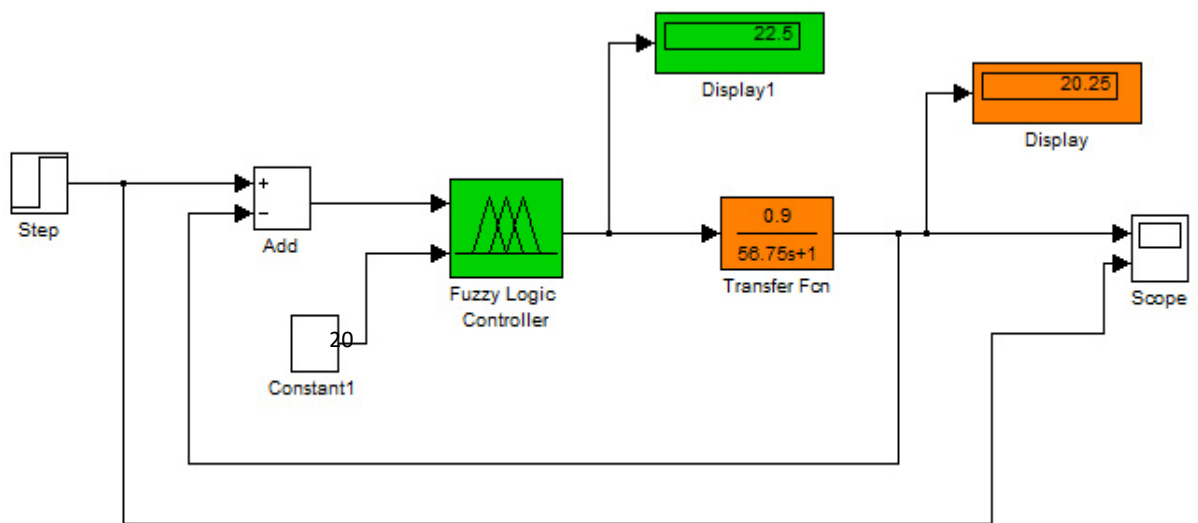
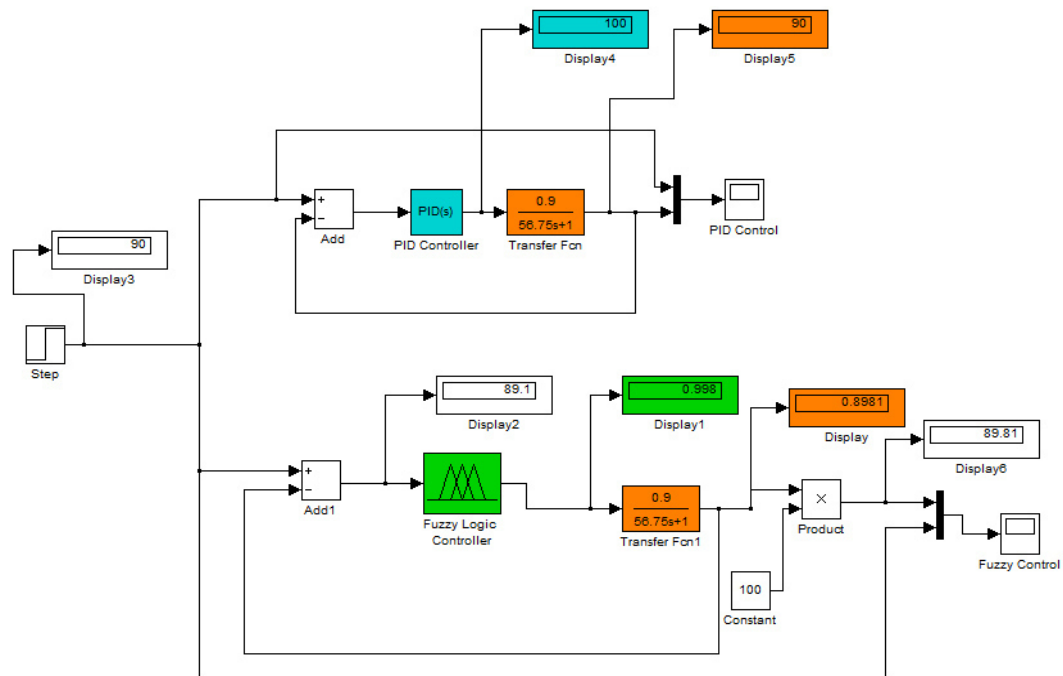


Figura 52 Respuesta del bloque del control difuso aplicado a la planta.

### 5.2.5 Lazo de Control Difuso vs Control PID

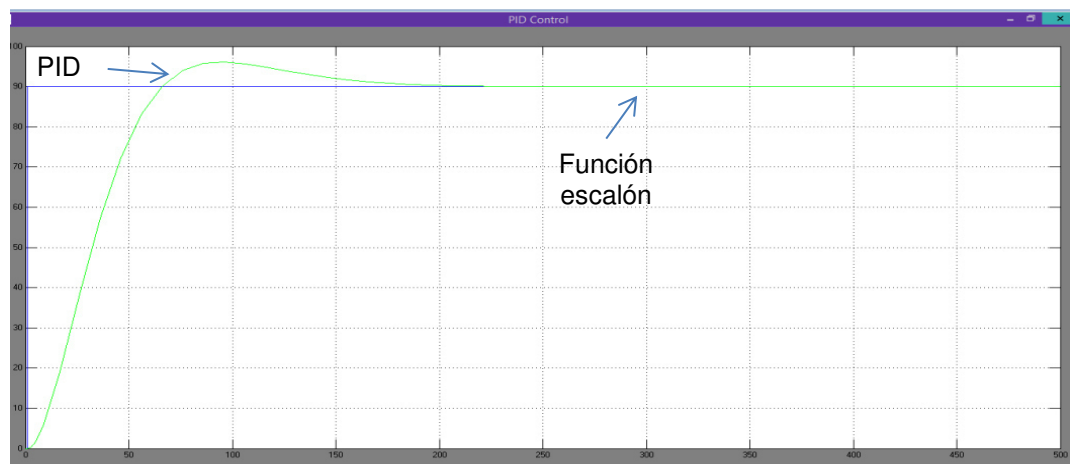
Hacemos la comparativa del lazo de control con PID vs. el lazo de control con Lógica difusa aplicado a nuestra planta.



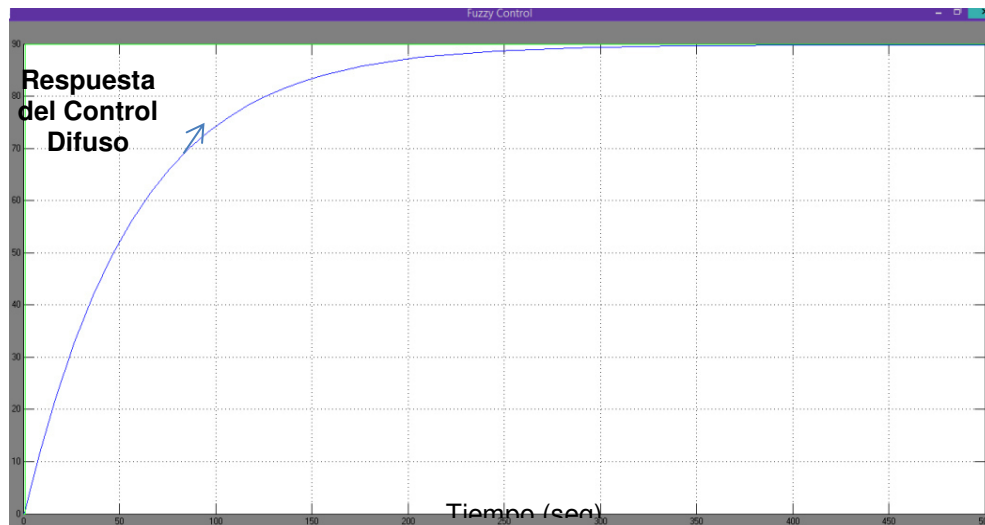


**Figura 53** Lazos de control con PID y Lógica Difusa con punto de consigna a 90%HR

Se desarrolla los siguientes lazos de control donde aplicamos un escalón de 0 a 90% de HR del cual obtenemos de cada lazo una respuesta. Para el lazo de PID tenemos 90%HR (figura 6.6) requerida a nuestro control así mismo para nuestro lazo de Lógica Difusa obtenemos 89.81% de HR (figura 6.7) ambos cubriendo el punto de consigna requerido.

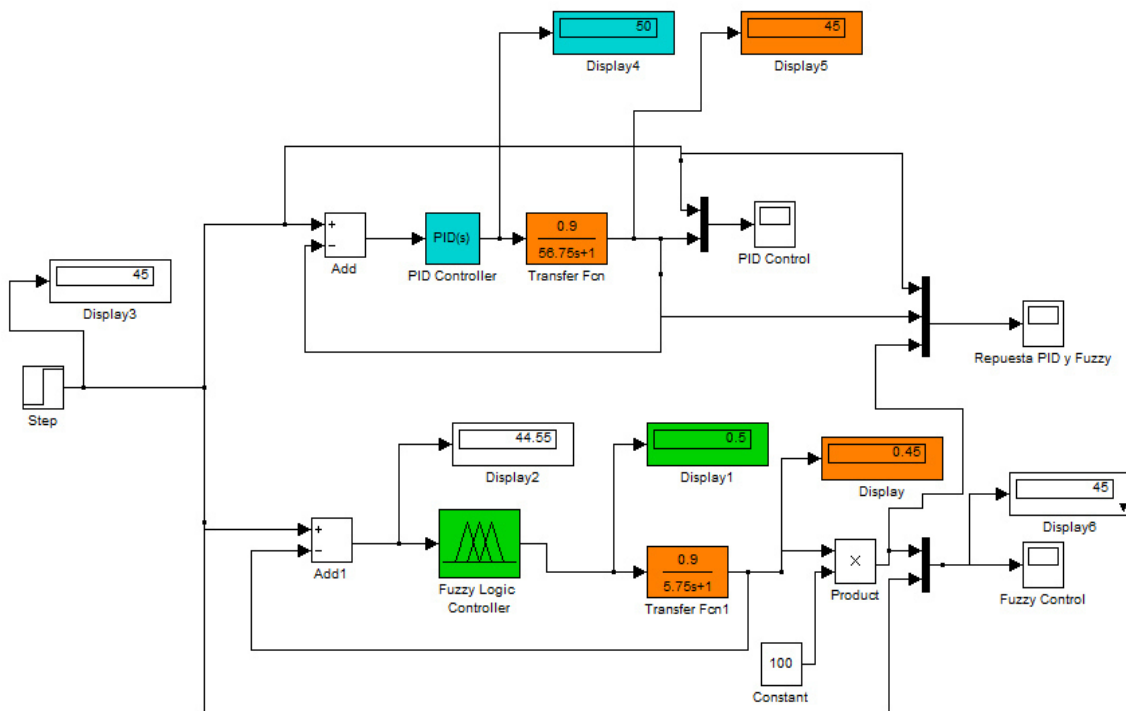


**Figura 54** Respuesta a 90%HR del bloque del PID aplicado a la planta.



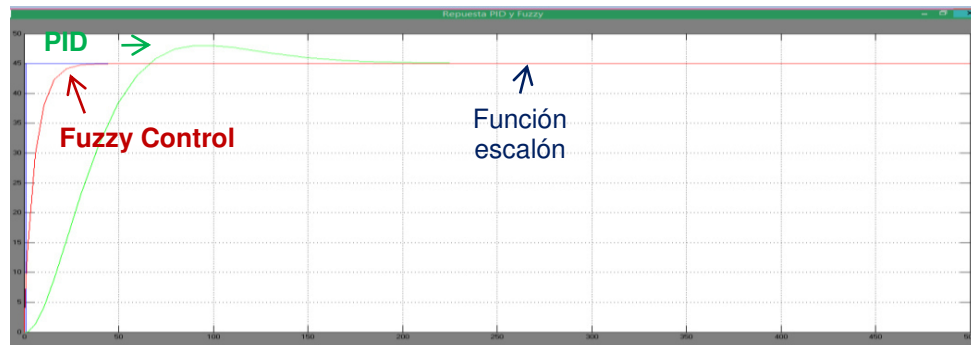
**Figura 55** Respuesta a 90%HR del bloque del Control Difuso aplicado a la planta.

Se presenta otro ejercicio donde se corrió el punto de consigna a un valor de 45% de HR



**Figura 56** Lazos de control con PID y Lógica Difusa con punto de consigna a 45%HR

El lazo de control con PID responde al punto de consigna requerido de 45% de HR dando como respuesta lo requerido (figura 6.9) al igual que el bloque de control de lógica difusa nos entrega un 45% de HR (figura 6.9).



**Figura 57** Lazos de control con PID y Lógica Difusa con punto de consigna a 45%HR

En la gráfica de la figura 57 podemos observar que la respuesta ante el escalón de 45% de HR el control PID tiene una respuesta de estabilización en un tiempo de 230 segundos contra el tiempo de estabilización del control difuso de 40 segundos siendo este más rápido que el control PID.

### 5.3 Discusión de Resultados

Este trabajo se enfocó al planteamiento de un algoritmo para control de humedad en una cámara climática dando como resultado la generación del lazo de control descrito en la figura 6.8. Mediante este proyecto se ha incursionado al control térmico obteniendo conocimientos en estrategias de control por medio del uso del modelo matemático PID y el desarrollo del bloque de control de Lógica Difusa (Fuzzy Logic) usando el software de Fuzzy Logic ToolBox de Matlab/Simulink como herramienta de simulación de los lazos de control desarrollados para la aplicación requerida en este trabajo.

El modelo del PID es el controlador industrial más usado y conocido actualmente además que en este trabajo se incluyó el uso del modelo de Lógica Difusa del cual aún no es muy popular pero la experiencia que se tuvo en este trabajo con esta forma de control fue enriquecedora ya que para la construcción del bloque de Lógica Difusa no fue requerido de métodos matemáticos complejos como los que son usados para el modelo de PID. Para el desarrollo del bloque de Lógica Difusa basta con incorporar el razonamiento humano en el algoritmo de control y simplifica el diseño de controlador.

Comparando con el control tradicional, el control difuso tiene dos ventajas prácticas, una es el modelo matemático del proceso a controlar no es requerido y otra es que se obtiene un controlador No-Lineal desarrollado empíricamente sin complicaciones matemáticas.

El controlador Fuzzy diseñado es capaz de controlar dos entradas y una salida, este algoritmo generado puede ser usado para manejar otros tipos de variables físicas además de la humedad relativa manejada en este trabajo.

Una de las ventajas que obtuvo el Control Difuso sobre el modelo PID es la rapidez de la respuesta para llegar al punto estable del valor de la consigna requerida lo cual nos indica que el usar Fuzzy Logic Control junto con PID nos ayuda a mejorar la respuesta del lazo de control y así optimizar el algoritmo creado.

Mediante el uso de estas dos estrategias de control como PID y Lógica Difusa es factible crear y diseñar algoritmos de control para ser implementados en líneas de investigación de control térmico permitiendo generar procesos dinámicos estables que nos proveen de un mejor rendimiento de control y robustez en el sistema.

Los lazos de control descritos en la figura 6.8 son los algoritmos resultantes de los diferentes modelos matemáticos para el control de la humedad en una cámara climática.

# Capítulo6

## Conclusiones y Trabajo Futuro

### 6.1 Conclusiones

El Laboratorio de Clima controlado forma parte de los Laboratorios de Innovación e Investigación en Tecnología Energética de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Dentro de la infraestructura de dicho laboratorio se encuentra una cámara climática, en ella se realizan distintas pruebas de desempeño en productos terminados o en fase de desarrollo dedicados a la industria de la refrigeración doméstica de alimentos. Esta cámara climática fue diseñada por miembros del Cuerpo Académico Consolidado Procesos Termofluidodinámicos y Nuevos sistemas energéticos, y proveedores especializados la construyeron. En una primera versión la cámara climática incorporó control de temperatura empleando PLC convencional proporcionado por el proveedor del equipo. La respuesta del sistema no era precisa.

En un trabajo previo a esta tesis se enfocó en la implementación de control adaptativo para cubrir un amplio rango de temperatura de operación de la cámara, aunque los resultados fueron satisfactorios aún no se contaba con el control de la temperatura.

El objetivo general de este trabajo de tesis es crear un algoritmo de control para la humedad en el interior de una cámara climática, mismo que se alcanzó. El algoritmo final descrito en la figura 6.8 enlaza los modelos matemáticos a crear para la aplicación de humidificación y control. El algoritmo de lazo cerrado desarrollado permite llevar al sistema al punto de consigna requerido y mantener la variable controlada dentro de su punto de consigna.

El modelo del PID lleva a la planta a su punto de consigna requerido, la respuesta del sistema presenta un pequeño sobre-impulso (oscilatorio de muy pequeña amplitud) de muy corto tiempo en alcanzar su punto de consigna, se muestra estable con los valores de sintonización obtenidos por medio del método matemático de criterios integrales.

El controlador Fuzzy lleva a la planta a su punto de consigna de manera satisfactoria, no muestra sobre-impulsos como en el modelo PID, si la salida del proceso es captadora de ruido, este tiene poca incidencia en las acciones de control en contraste con el controlador PID que es muy susceptible al ruido de alta frecuencia (debido a la parte derivativa). La respuesta del sistema general es comparable con la respuesta del sistema con controlador PID.

La mayor ventaja del control difuso es que provee una eficiente y efectiva metodología para desarrollar en forma experimental un controlador No-Lineal sin usar matemática avanzada. Hacer un controlador difuso requiere de una descripción lingüística de la ley de control, tal descripción es capturada por los conjuntos difusos, los operadores difusos y las reglas difusas. El controlador no necesita explícitamente del modelo del proceso a controlar como para el modelo del PID.

En muchas situaciones No-Lineales, el problema de control puede usualmente ser solucionado de manera más efectiva y eficiente que el control clásico.

El procedimiento de diseño y ajuste del controlador puede requerir de mucho trabajo, la herramienta de simulación de prueba y error es muy frecuentemente utilizada.

## **6.2 Trabajo Futuro**

Para la cámara climática de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica se encuentra en etapa de preparación el sistema de humidificación. Se planteará las actividades por realizar en la cámara de clima controlado. Las actividades a realizar se desarrollarán con apoyo del grupo de trabajo. Las actividades son las siguientes:

- Compra del deshumidificador  
Para este punto se tiene el siguiente modelo propuesto  
Modelo: DEHUM-S45, Marca: Calelec Heating, Capacidad en Litros: 21
- Instalación del Humidificador Marca Calelec Heating, Modelo HR231111T03/33.
- Generar el algoritmo creado en LabView
- Implementación y puesta en operación del sistema de control de humedad

### 6.3 Bibliografía

- [1] **Adrián Martín Cobos, Santos Méndez Díaz**, Implementación de un sistema de control de alta precisión en temperatura para una cámara de clima controlado, 2014.
- [2] **Yunes A Cengel**, Termodinámica, McGraw Hill, 7ª Ed. Pág. 738-751
- [3] **Michael J. Moran**, Fundamentos de Termodinámica Técnica, 2ª Ed. Pág. 653-680
- [4] **ASHRAE HANDBOOK, HVAC**, I-P Edition. 43.5, 43.6
- [5] **Katsuhiko Ogata**, Ingeniería de Control Moderna, 3ª Ed. Pág. 1-8, 211-23, 134-141, 669-682
- [6] **Richard C. Dorf**, Modern Control Systems, 9ª Ed. Pág. 366-368, 695-702
- [7] **Wolfgang Altmann**, Process Control for Engineers and Technicians, Pág. 112-127
- [8] **Katsuhiko Ogata**, Systems Dynamic, 4ª Ed. Pág. 491-591
- [9] **Stefan Koprda**, A design and simulation of fuzzy PID controller for the optimization of temperature and humidity in the thermodynamic system. Pág. 119-125
- [10] **Marco Antonio Perez Cisneros**, Sistemas de Lógica Difusa. Pág. 1-14
- [11] **Daniel García Arenas**, Control Ambiental Psicométrico Mediante Lógica Difusa. Pág. 49-53
- [12] **Smith-Corripio**, Control Automático de Procesos. 2ª Ed. Cap.3, 6 y 7.
- [13] **Guillermo Tejada Muñoz**, Tutorial de Lógica Difusa. Pág. 18-28, 2014.
- [14] **Math Works, Fuzzy Logic Toolbox**, Pág. 2-2 - 2-53, 2014.
- [15] **Omid Zadehbagheri, Hossein Eskandari**, Humidity Process Controlling using Fuzzy Type 1 and Fuzzy Type 2 with PID Controller. Junio 2014.
- [16] **Stefan Koprda, Zoltan Balogh**, A design and simulation of fuzzy PID controller for the optimization of temperature and humidity in the thermodynamic system. Enero 2014.

- [17] **P.A. Saudagar.** Design of Fuzzy Logic Controller for Humidity Control in Greenhouse. Diciembre 2012.
- [18] **J. Dostal, L. Ferkl.** Model Predictive Control of Climatic Chamber with On-off Actuators. Agosto 2014.
- [19] **Jose Antonio Mtz.** Control de la Humedad Relativa y Temperatura de un invernadero mediante control difuso. Octubre 2006.
- [20] **Marco Antonio Perez, James Vernon.** Sistemas de Lógica Difusa. Agosto 2013.
- [21] **Alberto Lorandi.** Controladores PID y Controladores Difusos. Enero 2011.
- [22] **S.R. Vaishnav.** Design and Performance of PID and Fuzzy Logic Controller with smaller rule set for higher Order System. Octubre 2007.
- [23] **Gaurav Amrit Kaur.** Comparison between conventional PID and Fuzzy Logic Controller for Liquid Flow Control: Performance Evaluation of Fuzzy Logic and PID Controller by using Matlab/Simulink. Junio 2012.